

Overtopping Height Variation According to Beach Fill and Installation of the Submerged Breakwaters on the Songdo-Beach in Busan

by
Young Je Yun

**Department of Civil & Environment Engineering
Graduate School
Korea Maritime University**

ABSTRACT

The various coastal and harbour structures have been constructed to prevent coastal erosion from severe incident waves and to make a tranquility of coastal area. Among them, submerged breakwater has been evaluated to excellent coastal structure in the side of environment and landscape besides original function of waves and sediment transport controller. So submerged breakwater has constructed in the many countries. Also, the beach performs role of recreation, water space and ocean eco-space, in addition, the beach is effective to reduce wave runoff and wave energy and has a function for preventing overflow.

In Busan Song-beach, coastal erosion was serious situation due to a tidal wave driven by a typhoon or severe incident waves and this area was often inundation. For this reason damages are frequently happen. Therefore, coastal

improvement project to prevent loss of sand of Songdo-beach was planed and is constructing by national project of MMAF(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries). By the result, beach fill and submerged breakwater were established in 2005 and coastal improvement project is performing gradually until 2007.

This study reinterpret wave control effect of already constructed submerged breakwater(Reflection coefficient, transmission coefficient and tranquility) and then examine applicability of the numerical analysis in comparison with results of hydraulic model test. Also, in case of the shallow water waves entering that calculated from the newly designed deepwater wave as to design water level which are considered by based on both approx highest high water level(App.H.H.W) and storm surge height, this study compare and examine from a numerical change of overtopping height on sand beach about before and after beach fill, in addition beach fill and establishment of submerged breakwater. In result, reduce of overtopping height appeared plenty of effect after beach fill, and when beach fill with submerged breakwater was established, the overtopping height decreased remarkably. As a result of this, effectiveness of beach fill and submerged breakwater that were constructed by purpose of coastal improvement project was confirmed.

양빈 및 잠제 설치에 따른 부산 송도해수욕장에서 월파고의 변화에 관한 연구

尹 榮 禧

韓國海洋大學校 大學院
土木環境工學科

요 약

고파랑으로부터 해안침식을 방지하고, 연안해역의 정온화를 도모하기 위하여 다양한 해안·항만구조물들이 건설되어 왔다. 그 중에서 잠제는 파랑 및 표사제어라는 본래의 기능 이외에 연안해역의 경관적인 측면 및 해수교환과 같은 환경적인 측면에서도 탁월한 해안구조물로 평가되어 많은 나라에서 시공되어 왔다. 또한, 해수욕장의 백사장은 휴양 및 친수공간으로, 또한 해양생태공간으로 역할을 수행할 뿐만 아니라, 파의 처오름과 파랑에너지를 감소시키는데 효과적이며, 월류로 인한 인접지역의 침수범람을 막을 수 있는 방재기능까지도 수행한다.

부산 송도해수욕장은 태풍해일 및 고파랑 등으로 인하여 해안침식이 심각하고, 침수범람이 잦은 지역으로, 그로 인한 피해도 다수 발생하고 있

다. 따라서, 현재 해양수산부의 국책사업으로 부산 송도해수욕장의 사빈유실을 방지하기 위한 연안정비사업이 계획되어 시공중에 있다. 그 성과로 2005년도에 양빈 및 잠제의 설치가 완료된 상태이며 2007년까지 연차적으로 연안정비사업이 수행될 예정이다.

본 연구에서는 사빈유실방지대책의 일환으로 기시공된 잠제의 파랑제어 효과(반사율, 투과율 및 정온도)를 재해석하고, 그 결과를 단면수리모형실험의 결과와 비교·검토하여 본 수치해석의 정도 및 적용성을 논의한다. 또한, 약최고고조위와 폭풍해일고를 고려한 설계조위에 대해 신심해설계파로부터 산정된 천해파랑이 입사하는 경우 양빈 전·후 및 양빈과 잠제가 설치된 상황에 대한 사빈상에서의 월파고 변화를 수치해석으로 비교·검토한다. 그 결과 양빈후가 월파고를 감소시키는데 상당한 효과가 있음을 확인할 수 있었으며, 또한 양빈과 더불어 잠제가 설치된 경우 월파고는 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이로부터 연안정비사업의 일환으로 수행된 잠제 및 양빈의 효용성을 확인할 수 있었다.

目 次

ABSTRACT	i
요약	iii
目次	v
LIST OF FIGURES	viii
LIST OF TABLES	xi
LIST OF SYMBOLS	xii

제 1장 서 론	1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 송도해수욕장의 과거 및 피해사례	3
1.3 연구의 구성	6

제 2장 수치해석이론	8
2.1 SWAN모델에 의한 천해파랑의 해석이론	8
2.1.1 SWAN모델의 개요	8
2.1.2 파랑작용의 평형방정식(Wave Action Balance Equation)	8
2.1.3 바람에 의한 에너지유입 S_{in}	9
2.1.4 에너지소산 S_{ds}	12
(1) 백파(Whitecapping)에 의한 에너지소산	12
(2) 저면마찰(Bottom Friction)에 의한 에너지소산	14
(3) 쉘파(Depth-Induced Wave Breaking)에 의한 에너지소산	15
2.1.5 비선형 상호작용에 의한 에너지 전달 S_{nl}	16
(1) 네 파랑 비선형상호작용(Quadruplet Wave-Wave Interactions) ..	16
(2) 세 파랑 비선형상호작용(Triad Wave-Wave Interactions)	18
2.2 VOF법에 의한 월파의 해석이론	20
2.2.1 VOF법의 개요	20

2.2.2 기초방정식	20
2.2.3 VOF함수의 이류방정식	22
2.2.4 무반사모델	23
(1) Sommerfeld의 방사경계조건	23
(2) 에너지감쇄대	23
제 3장 잠제에 의한 파랑변형	25
3.1 개요	25
3.2 단면수리모형실험	25
3.2.1 수리실험의 개요	25
3.2.2 실험파랑 및 결과	26
(1) 실험파랑	26
(2) 실험결과	26
3.3 단면수치모형실험	28
3.3.1 수치실험의 개요	28
3.3.2 실험파랑 및 결과	28
(1) 실험파랑	28
(2) 실험결과	29
3.4 단면수리·수치모형실험결과의 비교	30
3.4.1 설계파랑조건	30
3.4.2 이상파랑조건	30
3.4.3 기타 파랑조건	32
3.4.4 비교 결과	32
제 4장 SWAN모델에 의한 평면파랑 계산	34
4.1 개요	34
4.2 광역에서 천해파랑의 추산결과	34
4.3 중간역에서 천해파랑의 추산결과	36
4.4 협역에서 천해파랑의 추산결과	39
4.4.1 잠제가 없을 때	39
4.4.2 잠제가 있을 때	44

4.4.3 수위변화 및 월파해석을 위한 대표값 산정	49
제 5장 사빈상에서 수위변화 및 월파해석	51
5.1 수치파동수로	51
5.2 사빈상에서 수위변화	52
5.3 사빈상에서 월파	57
제 6장 결 론	61
<참고문헌>	63

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 Location of Songdo coastal area	2
Fig. 1.2 The past of Songdo-beach(1920)	3
Fig. 1.3 A diving board(1950)	4
Fig. 1.4 A cable car(1970)	4
Fig. 1.5 The past of Songdo-beach(2002)	4
Fig. 1.6 The damage from typhoon Maemi(1)	5
Fig. 1.7 The damage from typhoon Maemi(2)	5
Fig. 1.8 The Songdo-beach after coastal improvement project(2005)	6
Fig. 2.1 Definition sketch of numerical wave channel	20
Fig. 3.1 Definition sketch of numerical wave channel	25
Fig. 3.2 Comparison of experiment and calculation	31
Fig. 3.3 Comparison of experiment and calculation	31
Fig. 3.4 Comparison of experiment and calculation	32
Fig. 4.1 Distribution of significant wave heights on Wide Area(Dir=SSW) ...	35
Fig. 4.2 Distribution of significant wave heights on Wide Area(Dir=S)	35

Fig. 4.3 Distribution of significant wave heights on Wide Area(Dir=SE)	36
Fig. 4.4 Distribution of significant wave heights on Wide Area(Dir=ESE)	36
Fig. 4.5 Distribution of significant wave heights on Middle Area(Dir=SSW) ...	37
Fig. 4.6 Distribution of significant wave heights on Middle Area(Dir=S)	37
Fig. 4.7 Distribution of significant wave heights on Middle Area(Dir=SE)	38
Fig. 4.8 Distribution of significant wave heights on Middle Area(Dir=ESE) ...	38
Fig. 4.9 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=SSW)	40
Fig. 4.10 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=S)	41
Fig. 4.11 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=SE)	42
Fig. 4.12 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=ESE)	43
Fig. 4.13 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=SSW)	45
Fig. 4.14 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=S)	46
Fig. 4.15 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=SE)	47

Fig. 4.16 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area(Dir=ESE)	48
Fig. 4.17 A designed plane figure	49
Fig. 5.1 Definition sketch of numerical wave channel	51
Fig. 5.2 Spatial distribution of η_{\max} and η_{\min} (Dir=SSW)	53
Fig. 5.3 Spatial distribution of η_{\max} and η_{\min} (Dir=S)	54
Fig. 5.4 Spatial distribution of η_{\max} and η_{\min} (Dir=SE)	55
Fig. 5.5 Spatial distribution of η_{\max} and η_{\min} (Dir=ESE)	56
Fig. 5.6 Comparison of maximum overtopping heights	57
Fig. 5.7 Comparison of maximum overtopping heights for each direction	59
Fig. 5.8 Snapshots of Overtopping	60

LIST OF TABLES

Table 3.1 Conditions of incident waves in experiment	27
Table 3.2 Results of experiment	28
Table 3.3 Conditions of incident waves in calculation	29
Table 3.4 Results of calculation	30
Table 4.1 Deepwater design wave and water level for Songdo	34
Table 4.2 Reflection and Transmission coefficient by submerged breakwaters	44
Table 4.3 Characteristics of incident waves	50
Table 5.1 Conditions of incident waves	52

LIST OF SYMBOLS

a_b	저면 부근에서 수립자운동의 진폭
A	선형파의 성장계수
B	잠제의 천단폭
C	파속
C_{bottom}	저면마찰계수
C_D	저항계수
C_{ds}	조정계수
C_{ph}	위상속도
C_x	x 공간에서 주어지는 파랑전달속도
C_y	y 공간에서 주어지는 파랑전달속도
C_σ	σ 공간에서 주어지는 파랑전달속도
C_θ	θ 공간에서 주어지는 파랑전달속도
C_M	관성력계수
D_{tot}	쇄파에 의한 단위평면당 평균에너지소산
δ	조정계수
$E(\sigma, \theta)$	파랑에너지스펙트럼
E_{tot}	총파랑에너지
ϵ_v	체적공극율
ϵ_x	x 방향의 면적투과율
ϵ_z	z 방향의 면적투과율
f_w	무차원 마찰계수
F	VOF함수
g	중력가속도
H	에너지유입에 대한 필터
H_i	입사파의 파고

H_m	최대파고
$H_{1/3}$	유의파고
h	수심
η_{\max}	최대수위
η_{\min}	최소수위
J	상호작용계수
k	파수
k_p	JONSWAP스펙트럼의 첨두파수
\tilde{k}	평균 파수
\vec{k}	파수벡터
\hat{k}	Von Karman 정수
K_N	저면의 조도
l	에너지감쇠대의 넓이
l_0	에너지감쇠대의 개시위치
N	분포함수의 차수
$N(\sigma, \theta)$	파랑작용스펙트럼
p	압력
P	조정계수
Q_b	쇄파의 부분
R	비례축소계수
R_x	x방향의 항력
R_z	z방향의 항력
S	에너지의 유·출입을 포함하는 원천항
\tilde{s}	종합파형경사
S_{ds}	쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산
S_F	조파소스항
S_{in}	바람에 의한 에너지유입

S_{nl}	성분파간의 비선형상호작용에 의한 파랑에너지 전달
\tilde{s}_{PM}	Pierson-Moskowitz의 종합파형경사
T_i	입사파의 주기
$T_{1/3}$	유의주기
t	시간
u	x 방향의 유체입자속도
\overrightarrow{U}	유속벡터
U_r	Ursell 수
U_{rms}	저면궤도운동
U_{10}	해상 10m높이에서의 풍속
U_*	마찰속도
$U(x, t)$	조파소스의 수평유속
ν_ϵ	동점성계수
w	z 방향의 유체입자속도
ρ	유체의 밀도
ρ_a	공기의 밀도
ρ_w	해수의 밀도
β	Miles의 상수
$\bar{\beta}$	두 배 위상
τ	전응력
τ_w	파에 의한 유발응력
$\overrightarrow{\tau_w}$	파랑 응력벡터
x	수평좌표
Δx	수평방향의 격자간격
Δz	연직방향의 격자간격
x_s	조파소스의 위치

z	연직좌표
z_e	해면의 유효조도
α_{EB}	비례상수
ω	절대각주파수
θ	파향
θ_w	풍향
σ	각주파수
$\bar{\sigma}$	평균주파수
$\tilde{\sigma}$	평균각주파수
σ_{PM}	첨두주파수
λ	무차원 임계고
I	파형경사의 종속계수
γ_v	유체의 공극률
γ_x	x 방향의 면적공극률
γ_z	z 방향의 면적공극률

제 1장 서 론

1.1 연구의 배경과 목적

최근, 우리나라 전국 각지에서 여러 가지 원인으로 인한 해안침식 현상이 나타나고 있다. 해안침식 현상은 사회적인 문제만이 아니라 지자체의 경제적 측면에서도 큰 영향을 미칠 수 있으므로 박지 및 항내매물 등과 함께 연안에서 발생하는 대표적인 재해로서 정부차원에서 비중 있게 다뤄지고 있다. 특히, 모래 해변에서의 침식은 사회적으로 커다란 문제로 대두되고 있다.

모래해변은 외해역으로부터 내습한 파랑의 에너지를 감쇠시키는 해안방재 및 국토보존의 역할을 하며, 해양생태계의 유지 및 자연정화조로써의 역할을 수행하고 있고, 더불어 관광자원으로써 지자체의 경제적 수입에 커다란 기여를 하고 있다. 따라서, 과거부터 연안역의 이용이 활발하여 해안침식현상이 우리나라보다 먼저 나타난 선진국에서는 수십 년 전부터 중앙정부 및 해안에 위치한 지방자치단체가 스스로 대책을 세우고 막대한 투자를 아끼지 않고 있는 실정이다.

우리나라도 사회·경제적 측면에서 비약적인 발전을 거듭하면서 생활공간 및 관광자원으로서의 개발이 연안까지 확대되고 있으며, 그에 따라 전국 곳곳에서 모래해변의 침식문제가 해안재해의 하나로써 현실화되어 나타나고 있다. 특히, 모래해변이 상당히 침식된 상태에서 이상조위를 동반한 고파랑의 태풍이 내습한다면 인접지역은 상당한 피해를 입을 것이다. 예로, 2003년 9월 12일 만조시간대에 내습한 제 14호 태풍 매미로 인하여 송도해수욕장 주변은 큰 피해를 입었다.

우리나라 남쪽해역에 위치한 부산 송도해수욕장은 Fig. 1.1에 나타내는 바와 같이 부산 남향과 인접하며 남동측으로 트인 포켓만의 지형으로 외해역으로부터 파랑의 영향을 직접 받는 곳이다. 특히, 황천시 이상파가 내습하는 경우 파랑이 해수욕장 전면까지 밀어닥쳐 높은 파랑에너지가 전파되고 있으며 이로 인하여 단기적인 해저지형의 변동이 자주 발생하고 있는 지역이다.

이로 인하여, 사회적 문제로 대두되고 있는 해안침식 및 매년 되풀이되는 태풍피해를 근본적으로 해결하고, 우리나라 최초 해수욕장으로 개장된 송도해수욕

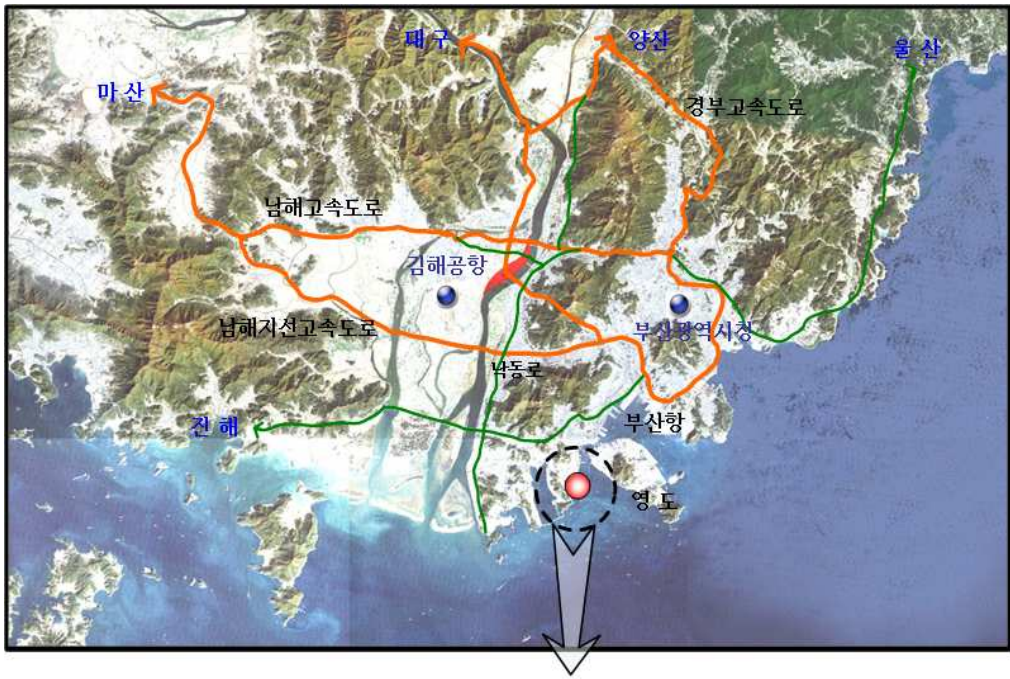


Fig. 1.1 Location of Songdo coastal area.

장의 옛 명성을 회복하기 위하여 2000~2007년에 걸쳐 해양수산부 국책사업인 연안정비사업의 일환으로 송도해수욕장의 연안정비사업이 계획 및 시공 중에 있다. 여기서, 송도해수욕장의 사빈유실대책공법으로 잠제와 양빈이 채택되었으며, 현재 송도해수욕장 전면해역에 기시공되어 그의 역할이 기대되고 있다.

본 연구에서는 송도해수욕장을 대상으로 폭풍해일고가 고려된 신심해설계파(한국해양연구원, 2005)를 적용하여 SWAN모델로 송도해수욕장 전면해역에 큰 영향을 줄 수 있는 네 지점의 심해파랑제원으로부터 천해파랑을 추산하였다. 그리고, SWAN모델에서 산정된 천해파랑제원을 적용하여 VOF(Volume of Fluid)법으로부터 투과성잠제 및 해빈이 고려된 2차원 수치파동수로를 이용하여 송도해수욕장 사빈상에서 양빈의 유무와 잠제의 유무에 따른 수위변화 및 호안천단에서의 월파고변화를 비교·검토하였다.

1.2 송도해수욕장의 과거 및 피해사례

모래사장의 침식이 발생하기 이전의 송도해수욕장은 충분한 모래해변을 보유하고 있었으며, 파랑의 내습에 대해서도 안전한 상태였다. Fig. 1.2~1.4는 각각 1920년대의 송도해수욕장, 1950년대의 다이빙대, 1970년대의 거북섬을 연결한 케이블카를 나타낸다.

Fig. 1.5는 2002년도의 송도해수욕장 전경으로 해안침식으로 인하여 상당한 양의 모래가 유실되어 과거에 비하여 해안선이 육측으로 상당히 이동된 상태였음을 알 수 있다.

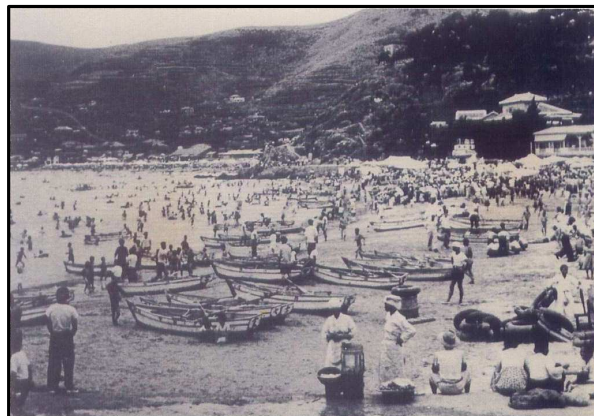


Fig. 1.2 The past of Songdo-beach.(1920)

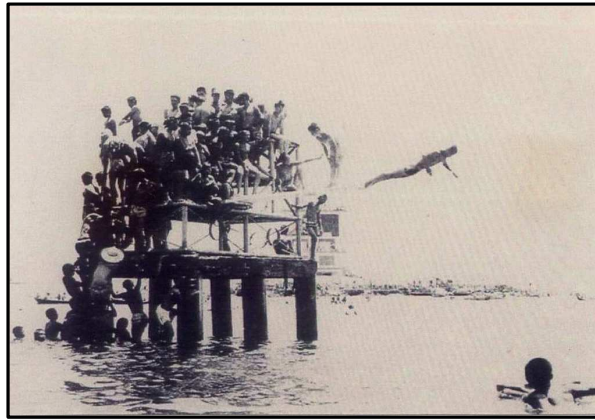


Fig. 1.3 A diving board.(1950)



Fig. 1.4 A cable car.(1970)



Fig. 1.5 The past of Songdo-beach.(2002)

Fig. 1.6~1.7은 Fig. 1.5와 같이 양빈과 잠제가 설치되기 이전인 2003년 9월 12일에 내습한 제 14호 태풍 매미로 인한 당시의 피해상황을 나타내고 있다. 대부분의 도로가 유실되어 형체를 알아볼 수 없으며, 심지어 상가에까지 파랑이 내습하여 많은 피해를 입었다.

Fig. 1.8은 송도연안정비사업으로 양빈을 실시하고, 주변시설을 친수공간으로 조성한 후 현재의 송도해수욕장 전경이다. 상당한 양의 양빈으로 해측으로 해안선이 많이 진행되어 있음을 알 수 있다.



Fig. 1.6 The damage from typhoon Maemi(1).



Fig. 1.7 The damage from typhoon Maemi(2).



Fig. 1.8 The Songdo-beach after coastal improvement project.(2005)

1.3 연구의 구성

본 연구는 다음과 같이 구성된다.

제 1장에서는 연구의 배경과 목적, 송도해수욕장의 과거 및 피해사례, 연구의 구성에 대하여 간단히 서술한다.

제 2장에서는 송도해수욕장 연안역에서 SWAN모델에 의한 천해파랑의 산정 이론과, 월파의 해석을 위한 VOF법의 기초이론을 기술한다.

제 3장에서는 현지의 파랑 · 수심 · 해저경사 등의 조건을 고려하여 잠제 주위의 파랑특성을 실험적으로 검토하여 최적의 단면설계에 필요한 기초자료를 제공한 단면수리모형실험을 단면수치모형실험으로 재현하였다.

제 4장에서는 송도해수욕장을 대상으로 폭풍해일고가 고려된 설계조위에 신심해설계파를 고려하고, SWAN모델로 송도해수욕장 전면해역에 큰 영향을 줄 수 있는 네 지점의 심해파랑제원으로부터 천해파랑을 추산하였다.

제 5장에서는 제 4장에서 산정된 해석의 시작점에서 유의파고 및 유의주기를 입사파랑의 제원으로 사용하여, 투과성잠제 및 해빈이 고려된 2차원 수치파동수로로부터 송도해수욕장 사빈상에서 양빈의 유무와 잠제의 유무에 따른 수위 변화 및 월파고변화를 검토 · 고찰한다.

제 6장에서는 이상의 검토로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 연구의

결론으로 한다. 마지막으로 본 연구에 있어서 참고하고 인용한 주요한 문헌을 제시한다.

제 2장 수치해석이론

2.1 SWAN모델에 의한 천해파랑의 해석이론

2.1.1 SWAN모델의 개요

SWAN(Simulation **W**Aves **N**earshore)모델은 주어진 바람장, 수심장 등을 조건으로 하여 심해설계파랑으로부터 연안역의 천해파랑을 산정하기 위한 수치파랑모델이다. 불규칙파랑모형인 SWAN모델에서는 파랑전파과정에서 발생하는 지리적 공간좌표상에서의 이류, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 굴절 및 천수, 역류에 의한 파랑의 반사 및 차단, 구조물에 의한 파랑의 반사 및 전달, Phase-Decoupled Approach를 이용한 회절, 파랑에 의한 평균수위변동 등을 고려할 수 있다. SWAN모델은 파랑작용의 평형방정식(Wave Action Balance Equation)에 기초하고 있으며, 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지유·출입을 표현하는 원천항(Source and Dissipation)으로 바람에 의한 에너지유입, 쇄파, 백파 및 저면마찰 등에 의한 파랑에너지소산을 포함하여 성분파간의 비선형상호작용에 의한 파랑에너지전달 등의 영향을 고려한다. 이하에 SWAN모델에서 사용하는 기초방정식 및 원천항에 대하여 간략히 기술한다.

2.1.2 파랑작용의 평형방정식(Wave Action Balance Equation)

흐름이 존재하는 경우 파랑의 작용은 보존되지만 에너지는 보존되지 않기 때문에 SWAN모델에서는 파랑에너지스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ 보다 일반화된 물리량인 파랑작용스펙트럼 $N(\sigma, \theta)$ 이 기초방정식에 적용되며, 파랑작용스펙트럼 $N(\sigma, \theta)$ 은 파랑에너지스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ 와 식(2.1)의 관계로 주어진다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (2.1)$$

여기서, θ 는 파향, σ 는 각주파수로 절대각주파수 ω 와 식(2.2)의 관계로 표현될 수 있다.

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (2.2)$$

여기서, \vec{k} 는 파수벡터, \vec{U} 는 유속벡터이다.

SWAN모델의 기초방정식은 직교좌표계에 대해 파랑작용의 평형방정식(2.3)으로 주어진다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial x} + \frac{\partial C_y N}{\partial y} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.3)$$

여기서, 좌변의 제 1항은 파랑작용스펙트럼의 시간변화량, 제 2항과 제 3항은 x, y 공간에서 파랑의 전달, 제 4항과 제 5항은 σ 와 θ 공간에서 수심과 흐름의 변화에 대한 상대주파수의 변형 및 굴절을 각각 나타낸다. 그리고, C_x, C_y 는 x, y 공간에서 주어지는 파랑의 전달속도, C_σ, C_θ 는 σ 와 θ 공간에서 주어지는 파랑의 전달속도를 각각 나타내며, 선형파이론으로부터 산정될 수 있다. 우변항 S 는 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지의 유·출입을 포함하는 원천항으로 식(2.4)로 주어진다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.4)$$

여기서, S_{in} 은 바람에 의한 에너지유입, S_{ds} 는 쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 파랑에너지소산, S_{nl} 은 성분파간의 비선형상호작용에 의한 파랑에너지전달을 각각 나타낸다.

2.1.3 바람에 의한 에너지유입 S_{in}

SWAN모델에서 바람에 의한 에너지유입은 식(2.5)로 표현된다.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2.5)$$

여기서, A 는 Phillips(1957)의 공명기구(Resonance Mechanism)를 반영한 것으로 선형파의 성장을 나타내며, SWAN모델에서는 Pierson-Moskowitz 주파수보다 낮은 저주파의 성장을 제한하기 위해 Cavaleri and Malanotte-Rizzoli(1981)의 식을 수정한 식(2.6)이 사용된다(Tolman, 1992a).

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2\pi g^2} [U_* \max \{0, \cos(\theta - \theta_w)\}]^4 H \quad (2.6)$$

여기서, g 는 중력가속도, θ_w 는 풍향을 각각 나타내며, U_* 는 SWAN모델에 적용되는 마찰속도로 해상 10m높이에서의 풍속 U_{10} 을 사용하여 식(2.7)로 정의된다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.7)$$

여기서, C_D 는 다음의 식으로 표현되는 Wu(1982)의 저항계수이다.

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} \\ (0.8 + 0.065s/m \times U_{10}) \times 10^{-3} \end{cases} \text{ for } \begin{cases} U_{10} < 7.5m/s \\ U_{10} \geq 7.5m/s \end{cases} \quad (2.8)$$

그리고, H 는 Pierson-Moskowitz 주파수보다 낮은 주파수대에서의 에너지유입에 대한 필터로서 식(2.9)로 주어진다.

$$H = \exp \{ - (\sigma / \sigma_{PM}^*)^{-4} \} \quad \text{with} \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (2.9)$$

여기서, σ_{PM} 은 Pierson-Moskowitz에 의한 충분히 발달된 해상에서의 침두주파수

이다.

한편, BE 는 파의 지속적 성장을 나타내며, 계수 B 는 Miles(1957)의 불안정기구 (Feed Back)로 SWAN모델에서는 Komen et al.(1984)의 식과 Janssen(1991a)의 식이 선택적으로 적용될 수 있다.

Komen et al.(1984)의 식은 Snyder et al.(1981)의 식에 근거한 식으로 식(2.10)으로 주어진다.

$$B = \max \left[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left\{ 28 \frac{U_*}{C_{ph}} \cos (\theta - \theta_w) - 1 \right\} \right] \sigma \quad (2.10)$$

여기서, C_{ph} 는 위상속도이며, ρ_a 와 ρ_w 는 각각 공기와 해수의 밀도이다.

Janssen(1991a)식은 경계층의 효과 및 해면의 조도에 의한 바람과 파랑의 상호작용을 고려한 다음의 식(2.11)로 주어진다.

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{C_{ph}} \right)^2 \max \{ 0, \cos (\theta - \theta_w) \}^2 \sigma \quad (2.11)$$

여기서, β 는 Miles상수로서 무차원 임계고(Critical Height) λ 를 사용하여 식(2.12)로 산정된다.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \beta = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1.2}{\hat{k}^2} \lambda (\ln \lambda)^4 & \text{for } \lambda \leq 1 \\ 0 & \text{for } \lambda > 1 \end{array} \right. & (2.12) \\ \lambda = \frac{gz_e}{C_{ph}^2} e^r & \text{with } r = \hat{k} c / | U_*^* \cos (\theta - \theta_w) | \end{array} \right.$$

여기서, \hat{k} 는 Von Karman 정수(=0.41)이며, z_e 는 해면의 유효조도로 평균수면에서 높이 z 에서의 풍속 $U(z)$ 를 식(2.13)으로 가정하면 식(2.14)로 산정된다.

$$U(z) = \frac{U_*}{\hat{k}} \ln \left(\frac{z + z_e - z_0}{z_e} \right) \quad (2.13)$$

$$z_e = \frac{z_0}{\sqrt{1 - \tau_w/\tau}} \quad (2.14)$$

여기서, τ 는 전응력(Total Stress), τ_w 는 파에 의한 유발응력(Wave Induced Stress), z_0 는 조도길이로 식(2.15)로 주어진다.

$$z_0 = \hat{\alpha} \frac{U_*^2}{g} \quad (2.15)$$

여기서, $\hat{\alpha} = 0.01$ 이며, 파랑 응력벡터 $\vec{\tau}_w$ 는 식(2.16)으로 산정된다.

$$\vec{\tau}_w = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma B E(\sigma, \theta) \frac{\vec{k}}{k} d\sigma d\theta \quad (2.16)$$

2.1.4 에너지소산 S_{ds}

(1) 백파(Whitcapping)에 의한 에너지소산

SWAN모델에서 백파과정은 Hasselmann(1974)이 제안한 파동에 기초한 모델(Pulse-Based Model)에 의하여 주어진다. 유한수심에서 적용될 수 있도록 파수향을 재정의하여(WAMDI group, 1988), 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (2.17)$$

여기서, Γ 는 파형경사의 종속계수, k 는 파수, $\tilde{\sigma}$ 와 \tilde{k} 는 각각 평균 각주파수와 평

균 파수를 나타낸다. 이 파형경사의 종속계수는 WAMDI group(1988)에서와 같이, Janssen(1991a, 1991b)에 근거하여 Günther et al.(1992)에 의하여 적용되었으며, 다음 식(2.18)로 표현된다.

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \left((1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \right) \left(\frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right)^P \quad (2.18)$$

여기서, $\delta = 0$ 인 경우에 Γ 에 대한 식은 WAMDI group(1988)이 이용한 식으로 귀착된다. 계수 C_{ds} , δ 및 P 는 조정계수이며, \tilde{s} 는 종합파형경사(Overall Wave Steepness), \tilde{s}_{PM} 은 Pierson-Moskowitz 스펙트럼(1964; $\tilde{s}_{PM} = (3.02 \times 10^{-3})^{1/2}$)에 대한 \tilde{s} 의 값이다. 종합파형경사 \tilde{s} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{E_{tot}} \quad (2.19)$$

평균 각주파수 $\tilde{\sigma}$, 평균파수 \tilde{k} 와 총파랑에너지 E_{tot} 는 각각 다음과 같이 정의된다(WAMDI group, 1988).

$$\tilde{\sigma} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1} \quad (2.20)$$

$$\tilde{k} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (2.21)$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.22)$$

SWAN모델에서 조정계수 C_{ds} , δ 와 지수 P 의 값은 심해에 대한 이상적인 파랑발달의 조건내에서 파랑의 에너지평형을 종결시키는 Komen et al.(1984)의

결과로부터 얻어진다. 이것은 파형경사 종속계수 Γ 식내의 계수들은 이용되는 바람데이터(Wind Input) 계산식에 의해 결정된다는 것을 나타낸다. 두 가지의 바람데이터(Wind Input)의 계산식이 SWAN모델에서 이용되므로 계수들도 두 가지의 형태를 가진다. Komen et al.(1984; WAM Cycle 3)의 식의 적용시에 계수들의 값은 각각 $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$, $\delta = 0$, $P = 4$ 이고, Janssen(1992)과 Günther(1992)의 식의 적용시에는 $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$, $\delta = 0.5$, $P = 4$ 의 값을 갖는다.

(2) 저면마찰(Bottom Friction)에 의한 에너지소산

저면마찰모델에는 JONSWAP(Hasselmann et al., 1973)의 경험모델, Collins(1972)의 저항법칙(Draw Law)모델과 Madsen et al.(1988)의 와동점성모델이 있다. 이러한 저면마찰모델들의 수식은 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (2.23)$$

여기서, C_{bottom} 은 저면마찰계수로서 일반적으로 U_{rms} 로 나타내는 저면궤도운동(Bottom Orbital Motion)에 영향을 받는다.

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.24)$$

Hasselmann et al.(1973)은 JONSWAP의 실험결과로부터 너울상태(Swell Conditions)에서는 $C_{bottom} = 0.038 m^2 s^{-3}$ 이라는 것을 밝혔다. Bouws and Komen(1983)은 천해의 충분히 발달된 파랑조건에 대하여 $C_{bottom} = 0.067 m^2 s^{-3}$ 을 채택하였다. 두 값들 모두 SWAN모델에서 이용된다.

Collins(1972)의 식은 불규칙파동장에 적합하도록 적용된 적절한 파라미터를 포함하는 규칙파에 대한 종래의 수식에 기초를 두고 있으며, $C_f = 0.015$ 일 때 저면마찰계수를 다음의 식(2.25)으로 나타내었다.

$$C_{bottom} = C_f g U_{rms} \quad (2.25)$$

Madsen et al.(1988)은 Hasselmann and Collins(1968)의 식과 유사한 수식을 유도하였지만, 그들의 모델에서는 저면마찰계수가 저면조도고(Bottom Roughness Height)와 실제 파랑조건의 함수로서 다음 식으로 주어진다.

$$C_{bottom} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad (2.26)$$

여기서, f_w 는 Jonssen(1966; Madsen et al., 1988)의 식을 이용하여 산정된 무차원 마찰계수이다.

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left[\frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right] = m_f + \log_{10} \left[\frac{a_b}{K_N} \right] \quad (2.27)$$

여기서, $m_f = -0.08$ (Jonsson and Carlsen, 1976), K_N 은 저면의 조도, a_b 는 저면 부근에서 수립자운동의 진폭(Representative Near-Bottom Excursion Amplitude)이며, 다음 식으로 표현된다.

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.28)$$

여기서, a_b/K_N 가 1.57보다 작으면 무차원 마찰계수 f_w 를 0.03으로 한다(Jonsson, 1980).

(3) 쇄파(Depth-Induced Wave Breaking)에 의한 에너지소산

불규칙파동장에서 쇄파에 의한 에너지소산을 모델링하기 위하여 SWAN모델에서는 Battjes and Janssen(1978)의 단파에 기초한 모델(Bore-Based Model)이 이용된다.

쇄파에 의한 단위평면당 평균에너지소산(D_{tot})을 다음의 식(2.29)로 나타낼 수 있다.

$$D_{tot} = -\frac{1}{4}\alpha_{BJ}Q_b\left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi}\right)H_m^2 \quad (2.29)$$

여기서, $\alpha_{BJ} = 1$, H_m 은 주어진 수심에서 존재하는 최대파고이고, $\bar{\sigma}$ 와 Q_b 는 각각 다음 식으로 결정되는 평균주파수와 쇄파의 부분을 나타낸다.

$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.30)$$

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (2.31)$$

여기서, E_{tot} 는 총파랑에너지이다.

스펙트럼의 방향을 포함하도록 Eldeberky and Battjes(1995)의 식을 확장하면, 단위 시간당 스펙트럼성분에 대한 소산은 다음 식으로 계산되며, 이것이 SWAN모델에서 사용되는 쇄파소산공식이다.

$$S_{ds, br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (2.32)$$

2.1.5 비선형 상호작용에 의한 에너지전달 S_{nl}

(1) 네 파랑 비선형상호작용(Quadruplet Wave-Wave Interactions)

네 파랑 비선형상호작용(Quadruplet Wave-Wave Interactions)은 Hasselmann et al.(1985)에 의해 제안된 이산상호작용근사(Discrete Interaction Approximation)로부터 계산된다. 이 근사법은 무수히 많은 네 파랑 상호작용 배치 중에서 가장 영향이 큰

하나의 배치만을 고려하는 것이다(실제로 이 배치에 대하여 경상(Mirror Symmetrical)도 고려하므로 총 배치수는 2개임). 배치에 포함되는 네 파랑의 주파수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma \\ \sigma_3 &= \sigma(1 + \lambda) = \sigma^+ \\ \sigma_4 &= \sigma(1 + \lambda) = \sigma^-\end{aligned}\tag{2.33}$$

여기서, λ 는 0.25로 설정된 일정계수이다. 첫 번째 배치에서 두 개의 파수벡터는 동일하다. 반면에 다른 두 파는 각각 상대적으로 $\theta_3 = 11.5^\circ$, $\theta_4 = -33.6^\circ$ 의 각도를 가지며 두 번째 배치에서는 $\theta_3 = -11.5^\circ$, $\theta_4 = 33.6^\circ$ 가 된다.

이산상호작용근사(DIA)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)\tag{2.34}$$

여기서, 우변의 첫 번째 항은 제 1배치에 의한 비선형상호작용이며, 두 번째 항은 제 2배치(제 1배치의 경상배치)에 의한 비선형상호작용항을 각각 나타낸 것으로 다음 식과 같이 계산된다(S_{nl4}^{**} 의 수식은 S_{nl4}^* 의 반대방향의 수식과 동일하다).

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4}(\alpha_1\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_2\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_3\sigma, \theta)\tag{2.35}$$

여기서, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = (1 + \lambda)$, $\alpha_3 = (1 - \lambda)$ 이다.

우변의 각 항은 다음 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned}\delta S_{nl4}(\alpha_i\sigma, \theta) &= C_{nl4}(2\pi)^2 g^{-4} \left(\frac{\sigma}{2\pi}\right)^{11} \\ &\times \left[E^2(\alpha_i\sigma, \theta) \left\{ \frac{E(\alpha_i\sigma^+, \theta)}{(1 + \lambda)^4} + \frac{E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda)^4} \right\} - 2 \frac{E(\alpha_i\sigma, \theta)E(\alpha_i\sigma^+, \theta)E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda^2)^4} \right]\end{aligned}\tag{2.36}$$

상수 C_{nl4} 는 3×10^7 이다.

Hasselmann and Hasselmann(1981)에 따르면 유한수심에서 네 파랑 비선형상호작용을 심해파에 대한 값으로 표현하는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{nl4, finite\ depth} = R(k_p d) S_{nl4, infinite\ depth} \quad (2.37)$$

여기서, R 은 비례축소계수(Scaling Factor)로 다음 식과 같다.

$$R(k_p d) = 1 + \frac{C_{sh1}}{k_p d} (1 - C_{sh2} \cdot k_p d) \exp(C_{sh3} \cdot k_p d) \quad (2.38)$$

여기서, k_p 는 본 계산이 실행되었을 때의 JONSWAP스펙트럼의 첨두파수이며, d 는 수심을 나타낸다. 또한, $C_{sh1} = 5.5$, $C_{sh2} = 6/7$, $C_{sh3} = -1.25$ 의 값으로 각각 주어진다. 천수한계에서, 즉 $k_p d \rightarrow 0$ 이면 비선형 전달은 무한이 된다. 따라서, $k_p d = 0.5$ 의 하한이 적용되며(Komen et al., 1994), 이 때 R 의 최대값은 $R(k_p d) = 4.43$ 으로 된다. 임의형상의 스펙트럼의 경우에 모델의 유연성을 증가시키기 위하여 첨두파수 k_p 는 $k_p = 0.75 \bar{k}$ 로 대체된다(Komen et al., 1994).

Hashimoto et al.(2003)은 네 파랑 구성(Quadruplet Configurations)의 수를 늘리면 DIA의 정도가 향상된다는 것을 밝혔다. 그들은 C_{nl4} 의 다른 값들을 가지는 6개의 파수 구성(Configurations)에 달하는 MDIA(Multiple DIA)를 제안하였으며, 이것은 엄밀계산법(RIAM)에 의하여 최적화되었다.

(2) 세 파랑 비선형상호작용(Triad Wave-Wave Interactions)

파장과 파고에 비하여 수심이 얕아지게 되면 세 파랑 비선형상호작용의 영향을 무시할 수 없게 된다. SWAN모델에서는 Eldeberky and Battjes(1995)의 DTA(Discrete Triad Approximation)방법의 Slightly Adapted Version인 Eldeberky(1996)의 LTA(Lumped Triad Approximation)가 개개의 스펙트럼 방향에서 이용되며, 다음의 식으로 주어질 수 있다.

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (2.39)$$

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max [0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin(\beta)| \{E^2(\sigma/2, \theta) - 2E(\sigma/2, \theta)E(\sigma, \theta)\}] \quad (2.40)$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(2\sigma, \theta) \quad (2.41)$$

여기서, α_{EB} 는 조정할 수 있는 비례상수이며, $\bar{\beta}$ (Biphase)는 두 배 위상으로 다음식과 같이 근사된다.

$$\bar{\beta} = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{Ur}\right) \quad (2.42)$$

여기서, Ursell 수 Ur 은, 다음 식과 같다.

$$Ur = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2} \quad (2.43)$$

여기서, $\bar{T} = 2\pi/\bar{\sigma}$ 이고, 보통 세 파랑 비선형상호작용은 $0.1 \leq Ur \leq 10$ 에 대해서만 계산된다. 그리고, 상호작용계수 J 는 다음식과 같이 정의된다(Madsen and Sorenson, 1993).

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 (gd + 2c_{\sigma/2}^2)}{k_{\sigma} d (gd + \frac{2}{15} g d^3 k_{\sigma}^2 - \frac{2}{5} \sigma^2 d^2)} \quad (2.44)$$

2.2 VOF법에 의한 월파의 해석이론

2.2.1 VOF법의 개요

최근, 자유수면을 갖는 비압축성 유체의 해석을 위해 Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF법이 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 활발히 활용되고 있다. 특히, 일본에서 잠제에 의한 쇄파해석에 岩田 등(1994)이 처음으로 VOF법을 적용한 이래 많은 연구자에 의한 공동연구의 결과로 개발된 CADMAS-SURF(沿岸開發技術研究Center, 2001)는 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. 국내에서는 金 등(2001, 2002)이 최초로 VOF-SOLA법을 이용한 수치파동수로를 제안하고 잠제주변의 파동장해석을 수행하고 있다.

VOF법을 적용하고 있는 수치파동수로는 Fig. 2.1과 같으며 2차원수치파동수로 내에 파의 제반사를 방지하지 위한 개경계처리기법으로 해석영역 양쪽에 부가가상감쇠영역(Added Dissipation Zone)을 두고 있고, 조파를 위해 조파소스(Wave Source)를 적용하고 있다. 이하에서는 VOF법에 의한 월파해석의 기본이론(金 등, 2001, 2002)에 대해 간략히 기술한다.

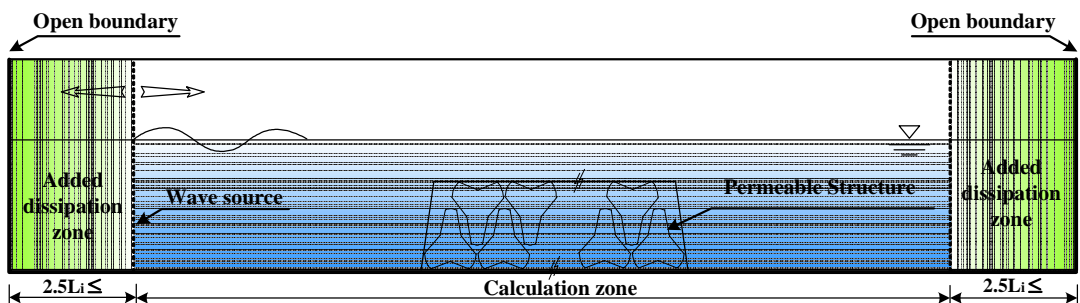


Fig. 2.1 Definition sketch of numerical wave channel.

2.2.2 기초방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면, 기초방정식은 연속방정식(2.45)와

Navier-Stokes방정식을 Porous모델로 확장한 운동방정식(2.46), (2.47)로 주어진다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_\rho \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \lambda_\nu \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} \lambda_\nu \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_\nu g \end{aligned} \quad (2.47)$$

여기서, t 는 시간, x, z 는 수평, 연직좌표, u, w 는 유속의 x, z 방향의 속도성분, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν_e 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합, g 는 중력가속도, γ_ν 는 유체의 공극률, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적공극률을 나타낸다. 또한, $\lambda_\nu, \lambda_x, \lambda_z$ 는 관성력계수를 C_M 으로 한다면 식(2.48)로 나타낼 수 있으며, 우변 제 2항이 구조물로부터 받은 관성력의 효과를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \lambda_\nu &= \gamma_\nu + (1 - \gamma_\nu) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \quad (2.48)$$

그리고, D_x, D_z 는 에너지감쇠대를 위한 계수이고, S_ρ, S_u, S_w 는 조파소스항으로 다음의 식과 같이 정의된다.

$$S_\rho = q(z, t) \quad (2.49)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (2.50)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (2.51)$$

여기서, $q(z, t)$ 는 $x = x_s$ 의 위치에서 격자간격을 Δx_s 로 두면 다음의 식(2.52)와 같이 주어진다.

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \quad (2.52)$$

여기서, $U(x, t)$ 는 조파소스의 수평유속이다. 또한, 항력항 R_x , R_z 를 항력계수 C_D 를 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.53)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.54)$$

여기서, $\Delta x, \Delta z$ 는 수평, 연직방향의 격자간격이다.

2.2.3 VOF함수의 이류방정식

본 수치파동수로에서는 자유표면을 추적하기 위해 VOF법(Hirt and Nichols, 1981)을 적용하고 있다. VOF함수 F 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가진다. $F=1$ 일 경우는 유체셀로, $F=0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단하여 자유수면을 추적하게 되며,

다음의 이류방정식(2.55)에 의해 VOF함수가 이류된다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (2.55)$$

여기서, $S_F = Fq(z, t)$ 는 조파소스를 위한 소스항이다.

2.2.4 무반사모델

정상상태의 파동장을 얻기 위해서는 장시간의 해석이 필요하게 되며, 이 때 해석영역의 양단으로부터 반사파를 제거하기 위하여 무반사모델의 적용이 요구된다. 따라서, 본 수치파동수로에서는 다음에 기술하는 Sommerfeld의 방사경계조건과 에너지감쇠대를 적용하여 무반사조건을 구성한다.

(1) Sommerfeld의 방사경계조건

개경계(Open Boundary)는 수치파동수로에서 수치계산을 수행하는데 있어서 가장 문제시되는 것으로 개경계조건으로는 식(2.56)의 Sommerfeld의 방사조건을 설정한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (2.56)$$

여기서, ϕ 는 유속 등의 물리량, C 는 파속이다.

(2) 에너지감쇠대

에너지감쇠대는 1~3과장 정도의 영역을 사용하여 파의 에너지를 서서히 감쇠시키는 것으로써 무반사를 실현하는 것이다. 이 때문에, 여분의 계산영역이 필요하지만, 여러 파형에 대해 적용가능하고, 동시에 안정한 계산결과가 간단히 얻어질 수 있다는 이점이 있다.

에너지감쇠대로서 식(2.46)과 식(2.47)의 운동방정식에 이하의 식(2.57) 및 식(2.58)에 나타내는 유속에 비례하는 감쇠항을 추가하였다.

· 방향유속의 감쇠항 $= -D_x u$

$$D_x = \theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (2.57)$$

· 방향유속의 감쇠항 $= -D_z w$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (2.58)$$

여기서, h 는 수심, l 과 l_0 는 에너지감쇠대의 넓이와 개시위치, N 은 분포함수의 차수, θ_x 와 θ_z 는 무차원계수이다.

제 3장 잠제에 의한 파랑변형

3.1 개요

제 3장에서는 현지의 파랑·수심·해저경사 등의 조건을 고려하여 구조물 주위의 파랑특성을 실험적으로 검토하여 최적의 단면설계에 필요한 기초자료를 제공한 단면수리모형실험을 단면수치모형실험으로 재현하였다. 본 수치모형실험에서 적용한 수치파동수로는 Fig. 3.1과 같으며, 2차원 수치파동수로내에 파의 재반사를 방지하기 위한 개경계처리기법으로 해석영역 양쪽에 부가가상감쇠영역(Added Dissipation Zone)을 두고 있고, 조파를 위해 조파소스(Wave Source)를 적용하고 있다.

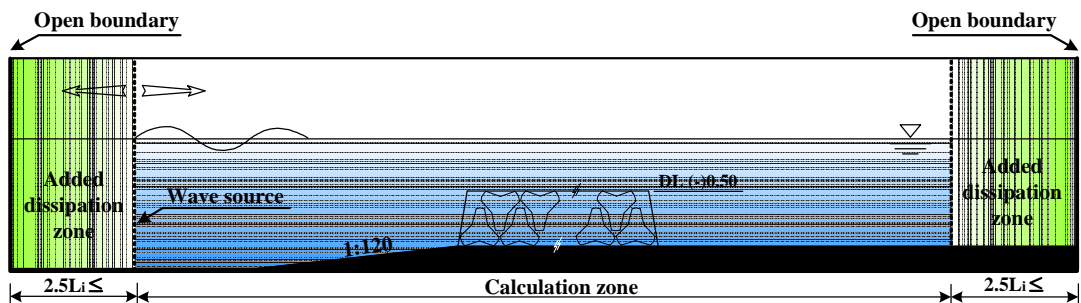


Fig. 3.1 Definition sketch of numerical wave channel.

3.2 단면수리모형실험

3.2.1 수리실험의 개요

송도해수욕장 일원의 연안정비사업에 따른 구조물 축조 실시설계를 위한 2차원 단면수리모형실험은 현지의 파랑·수심·해저경사 등의 조건을 감안하여 단면의 안정성 및 구조물 주위의 수리특성을 실험적으로 검토하여 최적의 단면설

계에 필요한 기초자료를 제공하는데 실험의 목적이 있다. 특히, 해수욕장의 모래 및 인근해저지형의 침식을 방지하기 위하여 제시된 구조물의 단면들에 대한 검토와 아울러 다양한 형태의 대안에 대한 소파효과 등을 검토하여 단면의 개선 및 보완을 위한 기초자료를 제공하기 위한 목적을 가지고 수행되었다.

송도지구에 설치될 구조물인 잠제에 대하여 여러 조건으로 실험이 수행되었으나, 본 절에서는 경관성, 경제성, 소파효과면에서 우수하여 현재 송도해수욕장에 기시공된 잠제단면에 대하여 잠제의 폭에 따른 수리모형실험 적용파랑과 그에 따른 결과를 나타낸다.

3.2.2 실험파랑 및 결과

(1) 실험파랑

수리모형실험에서 수행된 잠제의 폭에 따른 적용파랑은 Table 3.1과 같다. 구조안정 검토시 적용을 위한 설계파랑과 배후지 안정 및 이용성 검토를 위한 이상파랑에 대해서는 조위로써 삭망평균만조위($H.W.L$)를 사용하고, 기타조건에 대하여 평균수위($M.S.L$)를 사용하였다. 여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의주기, B 는 잠제의 천단폭을 각각 나타낸다.

(2) 실험결과

잠제를 통과한 파랑은 파고가 현저하게 감소되는 현상을 나타내었다. 설계파랑에 대하여 잠제의 천단폭을 40m, 50m, 60m로 변화시킬 경우 전달율은 각각 0.60, 0.53, 0.48로 나타났으며, 이상파랑에 대해서는 각각 0.59, 0.53, 0.48로 나타났다. 그리고, 유의주기 12.6s와 천단폭 40m에 대하여 유의파고를 3m, 2m, 1m로 변화시킬 경우 전달율은 각각 0.46, 0.51, 0.62로 나타났다.

동일한 유의주기와 유의파고에 대하여 잠제의 천단폭을 변화시킨 경우 천단폭이 클수록 전달율은 작아지며, 동일한 유의주기와 천단폭에 대하여 파고를 변화시킨 경우 파고가 작을수록 전달율은 커진다. 이것은 전자의 경우 잠제에 의한 저항길이의 변화가 전달율에 영향을 주었으며, 후자의 경우는 잠제 천단

상에서 쇄파로 인한 결과로 입사파고가 큰 경우에는 쇄파규모가 크기 때문에 전달파고가 작아지는 반면에 입사파고가 작은 경우에는 쇄파규모가 작거나 쇄파가 발생하지 않기 때문에 전달율이 커진 것으로 판단된다.

Table 3.1 Conditions of incident waves in experiment.

구 분	조 위	원 형			모 형			비 고
		$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	$B(m)$	$H_{1/3}(cm)$	$T_{1/3}(s)$	$B(cm)$	
설계파	$H.W.L$ $DL(+)1.43$	4.3	14.0	40	14.3	2.56	133	측 척 1/30
		4.3	14.0	50	14.3	2.56	167	
		4.3	14.0	60	14.3	2.56	200	
이상파		3.2	12.6	40	10.7	2.30	133	
		3.2	12.6	50	10.7	2.30	167	
		3.2	12.6	60	10.7	2.30	200	
기 타	$M.S.L$ $DL(+)0.65$	4.3	14.0	40	14.3	2.56	133	
		3.0	12.6	40	10.0	2.30	133	
		2.0	12.6	40	6.7	2.30	133	
		1.0	12.6	40	3.3	2.30	133	

Table 3.2 Results of experiment.

구 분	조 위	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	$B(m)$	전달파고 $H_{1/3}(m)$	전달율
설계파	$H.W.L$	4.3	14.0	40	2.53	0.60
		4.3	14.0	50	2.23	0.53
		4.3	14.0	60	2.03	0.48
이상파	$DL(+)1.43$	3.2	12.6	40	1.89	0.59
		3.2	12.6	50	1.68	0.53
		3.2	12.6	60	1.54	0.48
기 타	$M.S.L$ $DL(+)0.65$	4.3	14.0	40	1.88	0.45
		3.0	12.6	40	1.38	0.46
		2.0	12.6	40	1.01	0.51
		1.0	12.6	40	0.62	0.62

3.3 단면수치모형실험

3.3.1 수치실험의 개요

본 단면수치모형실험은 앞서 언급한 단면수리모형실험에 대하여 동일한 입사파랑조건 및 단면을 적용하여 VOF(Volume of Fluid)법으로 해석을 실시하였다. 그러나, 단면수리모형실험에서는 1/30축척을 사용한 반면에, 본 연구에서는 수치실험상 제한요소들로 인하여 1/40축척을 사용하여 해석을 실시하였다.

3.3.2 실험파랑 및 결과

(1) 실험파랑

단면수치모형실험에 적용한 입사파랑의 원형 및 모형을 Table 3.3에 나타내

었다. 여기서, H_i 는 입사파의 파고, T_i 는 입사파의 주기, B 는 잠제의 천단폭을 각각 나타낸다.

(2) 실험결과

설계파랑에 대하여 잠제의 천단폭을 40m, 50m, 60m로 변화시킬 경우 전달율은 각각 0.47, 0.30, 0.26로 나타났으며, 이상파랑에 대해서는 각각 0.37, 0.43, 0.41로 나타났다. 그리고, 주기 12.6s와 천단폭 40m에 대하여 파고를 3m, 2m, 1m로 변화시킬 경우 전달율은 각각 0.28, 0.29, 0.42로 나타났다.

주기와 파고가 동일한 값으로 주어질 때 잠제의 천단폭이 클수록 전달율이 작아지며, 동일한 주기와 천단폭에 대하여 파고가 클수록 전달율이 작아짐을 확인할 수 있다. 이것은 앞서 언급한 것과 같이 전자의 경우 잠제에 의한 저항길이의 변화가 전달율에 영향을 주었으며, 후자의 경우는 잠제 천단상에서 쇄파규모로 인하여 유의파고가 작을수록 전달율이 커진 것으로 판단된다.

Table 3.3 Conditions of incident waves in calculation.

구 분	조 위	원 형			모 형			비 고
		$H_i(m)$	$T_i(s)$	$B(m)$	$H_i(cm)$	$T_i(s)$	$B(cm)$	
설계파	$H.W.L$ $DL(+)1.43$	4.3	14.0	40	10.5	2.21	100	측 척 1/40
		4.3	14.0	50	10.5	2.21	125	
		4.3	14.0	60	10.5	2.21	150	
이상파		3.2	12.6	40	8.0	1.99	100	
		3.2	12.6	50	8.0	1.99	125	
		3.2	12.6	60	8.0	1.99	150	
기 타	$M.S.L$ $DL(+)0.65$	4.3	14.0	40	10.5	2.21	100	
		3.0	12.6	40	7.5	1.99	100	
		2.0	12.6	40	5.0	1.99	100	
		1.0	12.6	40	2.5	1.99	100	

Table 3.4 Results of calculation.

구 분	원 형			모 형				
	$H_i(m)$	$T_i(s)$	$B(m)$	$H_i(cm)$	$T_i(s)$	$B(cm)$	수치실험	
							반사율	전달율
설계 파	4.3	14.0	40	10.5	2.21	100	0.25	0.47
	4.3	14.0	50	10.5	2.21	125	0.26	0.30
	4.3	14.0	60	10.5	2.21	150	0.21	0.26
이상파	3.2	12.6	40	8.0	1.99	100	0.28	0.37
	3.2	12.6	50	8.0	1.99	125	0.32	0.43
	3.2	12.6	60	8.0	1.99	150	0.24	0.41
기 타	4.3	14.0	40	10.5	2.21	100	0.25	0.30
	3.0	12.6	40	7.5	1.99	100	0.37	0.28
	2.0	12.6	40	5.0	1.99	100	0.45	0.29
	1.0	12.6	40	2.5	1.99	100	0.50	0.42

3.4 단면수리 · 수치모형실험결과의 비교

3.4.1 설계파랑조건

설계파랑조건에 대하여 잠제의 천단폭이 40m, 50m, 60m로 변화될 경우 전달율에 대한 단면수리 · 수치모형실험결과를 Fig. 3.2에 나타내었다. 모든 경우에 대하여 단면수리모형실험 결과가 다소 큰 값을 나타내고 있다.

3.4.2 이상파랑조건

이상파랑조건에 대하여 잠제의 천단폭을 40m, 50m, 60m로 변화시킬 경우 전달율에 대한 단면수리 · 수치모형실험결과를 Fig. 3.3에 나타내었다. 설계파랑조

건에 대한 실험결과와 마찬가지로 모든 경우에 대하여 단면수리모형실험결과가 다소 큰 값을 나타내고 있으며, 그 차이는 잠제의 천단폭이 40m인 경우에 가장 크게 나타나고 있다.

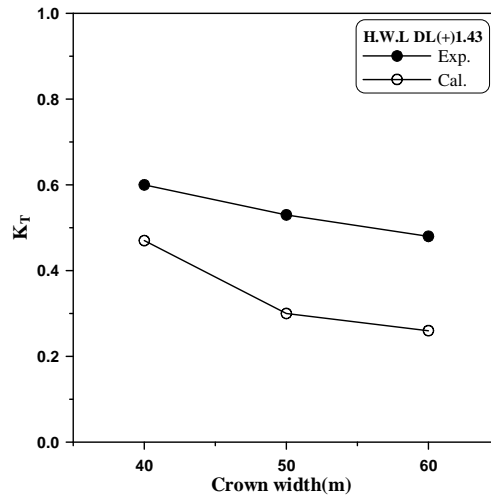


Fig. 3.2 Comparison of experiment and calculation.

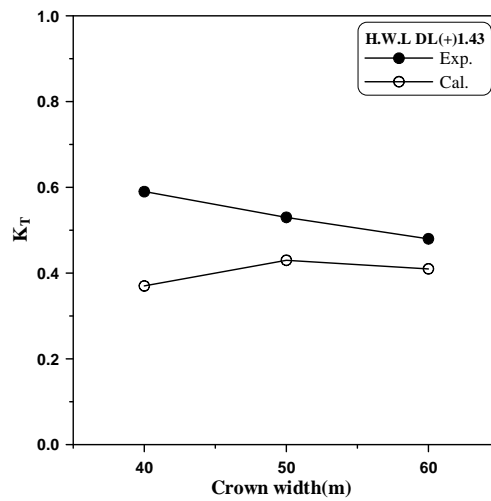


Fig. 3.3 Comparison of experiment and calculation.

3.4.3 기타 파랑조건

Table 3.1에서 나타낸 바와 같이 천단폭 40m, 주기 12.6s에 대하여 파고를 3m, 2m, 1m로 변화시킨 경우 전달율에 대한 실험결과를 Fig. 3.4에 나타내었다. 잠제의 천단상에서 쇄파규모로 인하여 파고가 커짐에 따라 전달율은 오히려 작아지고 있다. 그리고, 단면수리모형실험과 단면수치모형실험의 경향은 잘 일치하나 단면수리모형실험결과가 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다.

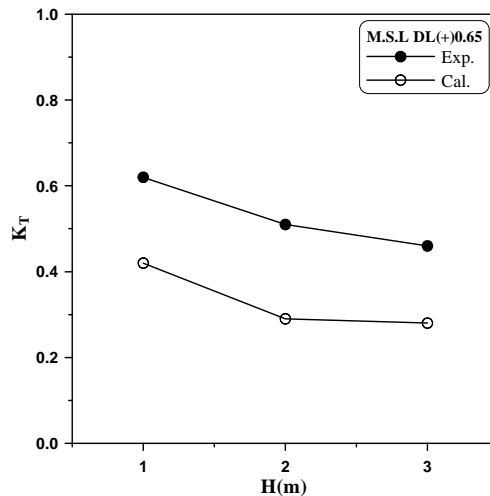


Fig. 3.4 Comparison of experiment and calculation.

3.4.4 비교 결과

전달율에 있어서 단면수리모형실험과 VOF법을 이용한 단면수치모형실험을 비교한 결과 단면수치모형실험이 상대적으로 작은 값으로 나타났다. 이는 단면수리모형실험이 실패양파와 유사한 불규칙파(irregular wave)를 조파하여 해석함으로써 상대적으로 전달율이 커진 것으로 판단된다. 또한, 수리모형실험에서는 1/30축척을 사용한 반면에 수치모형실험에서는 제한요소들로 인하여 1/40축척을 사용하여 해석함으로써 생기는 축척영향(scale effect)의 결과도 다소 영향을 준 것으로 판단된다. 결과적으로, 단면수리모형실험과 단면수치모형실험에 있어

서 전달율의 차이는 실험조건에 의한 차이로 판단되며, 실험결과의 경향에 있어서는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과에서는 잠제의 천단폭이 클수록 소파효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

제 4장 SWAN모델에 의한 평면파랑 계산

4.1 개요

송도해수욕장 전면해역의 천해파랑을 추산하기 위하여 연안격자점의 신심해설 계파(한국해양연구원, 2005)에 대하여 대상영역을 광역은 200m, 중역은 50m, 협역은 20m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였다. 여기서, 송도해수욕장 전면해역에 큰 영향을 줄 수 있는 심해파랑의 지점과 제원을 Table 4.1에 나타내었으며, 각 경우에 대해 평면파랑 계산을 수행하였다. 여기서, 설계조위는 약최고고조위(*App.H.H.W*)(해양수산부, 2000)에 해일고(*Storm Surge Height*)(김도삼, 2005)를 더한 값을 사용하였고, 계산영역의 수심과 해안선 및 구조물은 수치해도를 이용하여 추출하였으며, 충분하지 않은 자료는 실제측량데이터를 보충하여 사용하였다.

4.2 광역에서 천해 파랑의 추산결과

Fig. 4.1~4.4는 Table 4.1의 설계조위 및 신심해파랑조건으로부터 광역에서 수행된 송도해수욕장 전면해역에서의 유의파고분포에 대한 계산결과이다. 상대적으로 심해파랑 지점 54(N34°80′, E129°00′)번에 대한 유의파고분포가 송도해수욕장 전면해역에서 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 4.1 Deepwater design wave and water level for Songdo.

심해파랑 지점	심해설계파 제원			약최고고조위 (<i>m</i>)	해일고 (<i>m</i>)	설계조위 (<i>m</i>)
	$T_s(s)$	$H_s(m)$	<i>Dir</i>			
53(N34°80′, E128°83′)	11.91	6.12	SSW	1.30	1.19	약최고고조위 +해일고 <i>DL</i> (+) <i>2.49</i>
54(N34°80′, E129°00′)	15.41	11.37	S			
55(N34°94′, E129°17′)	13.85	11.21	SE			
56(N34°94′, E129°33′)	12.49	9.86	ESE			

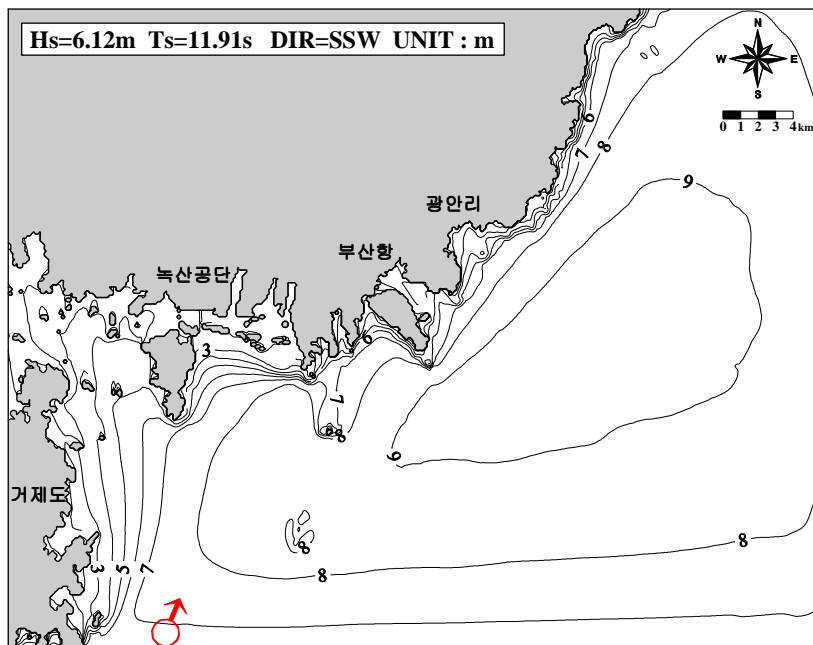


Fig. 4.1 Distribution of significant wave heights on Wide Area.(Dir=SSW)

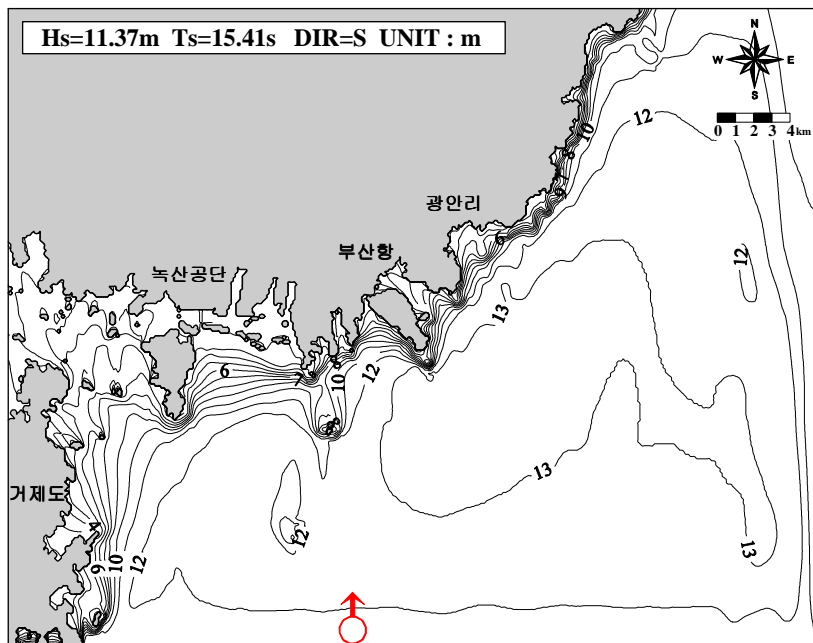


Fig. 4.2 Distribution of significant wave heights on Wide Area.(Dir=S)

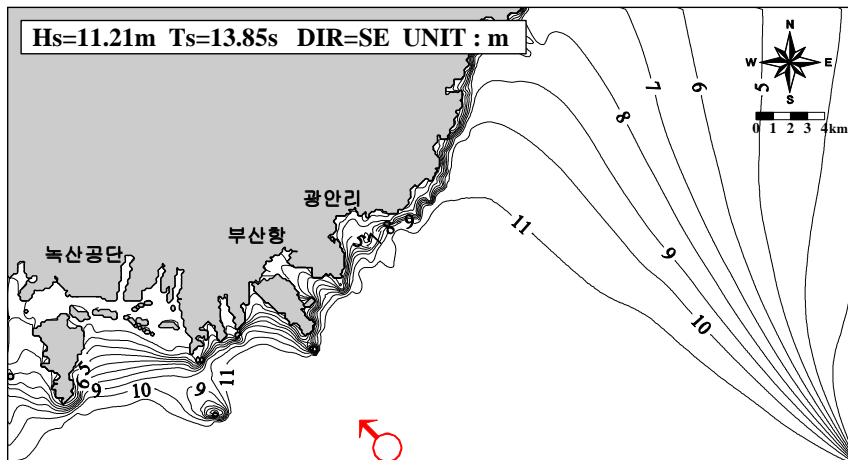


Fig. 4.3 Distribution of significant wave heights on Wide Area.(Dir=SE)

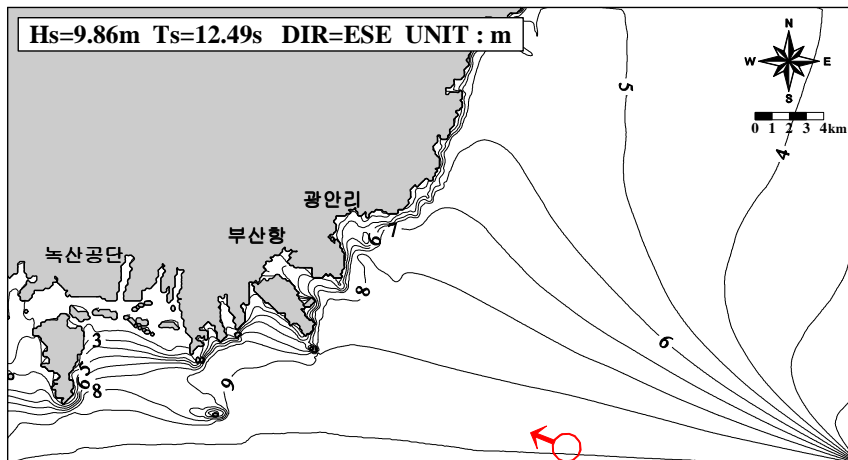


Fig. 4.4 Distribution of significant wave heights on Wide Area.(Dir=ESE)

4.3 중간역에서 천해 파랑의 추산결과

Fig. 4.5~4.8는 송도해수욕장 인근해역에서 각 심해파랑조건에 따른 중간역에서 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 심해파랑 지점 54(N34°80′, E129°00′)번과 55(N34°94′, E129°17′)번에 대한 파고분포가 53(N34°80′, E128°83′), 56(N34°94′, E129°33′)번의 경우에 비하여 송도해수욕장 전면해역에서는 대략 1.0m, 외

해에서는 대략 2.0~3.0m 정도로 높은 값을 나타내고 있다.

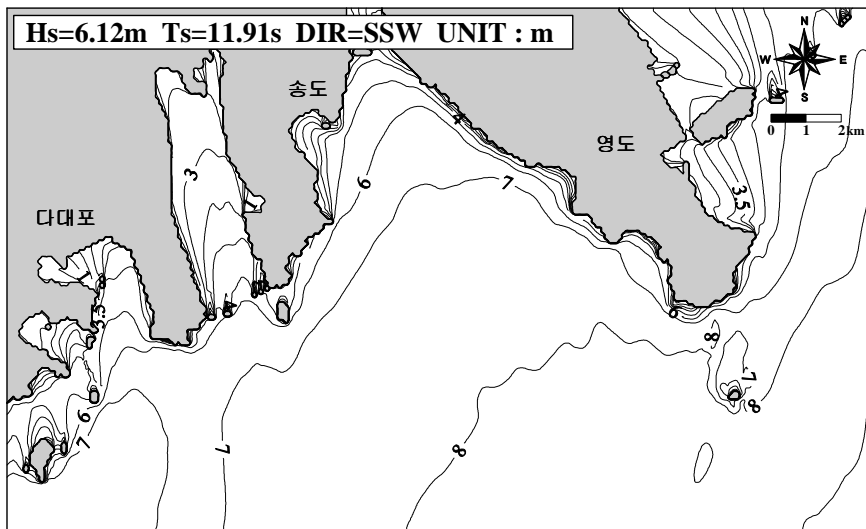


Fig. 4.5 Distribution of significant wave heights on Middle Area.(Dir=SSW)

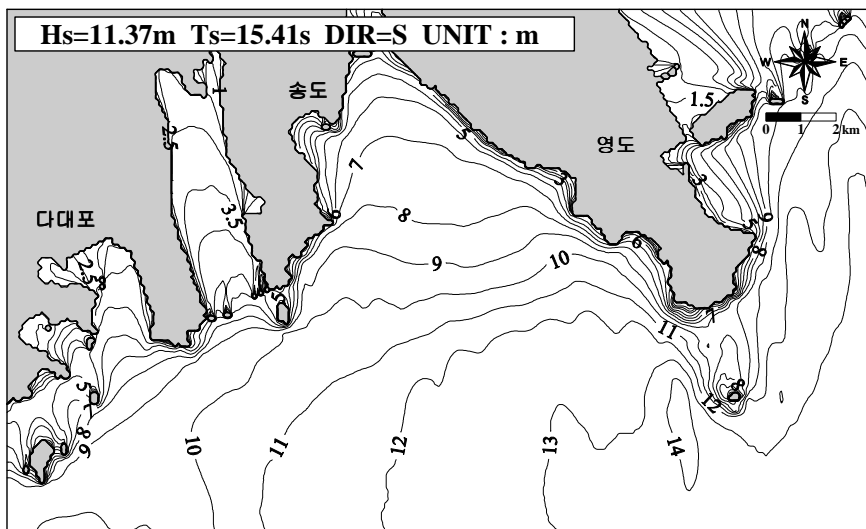


Fig. 4.6 Distribution of significant wave heights on Middle Area.(Dir=S)

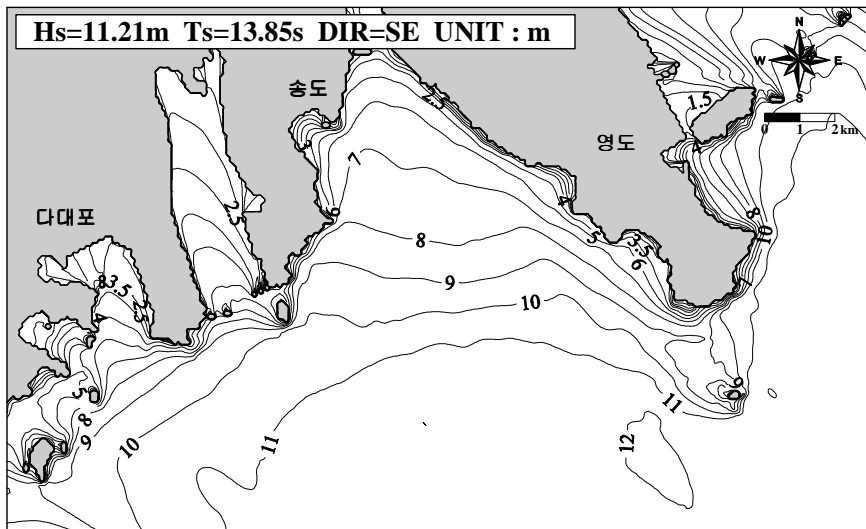


Fig. 4.7 Distribution of significant wave heights on Middle Area.(Dir=SE)

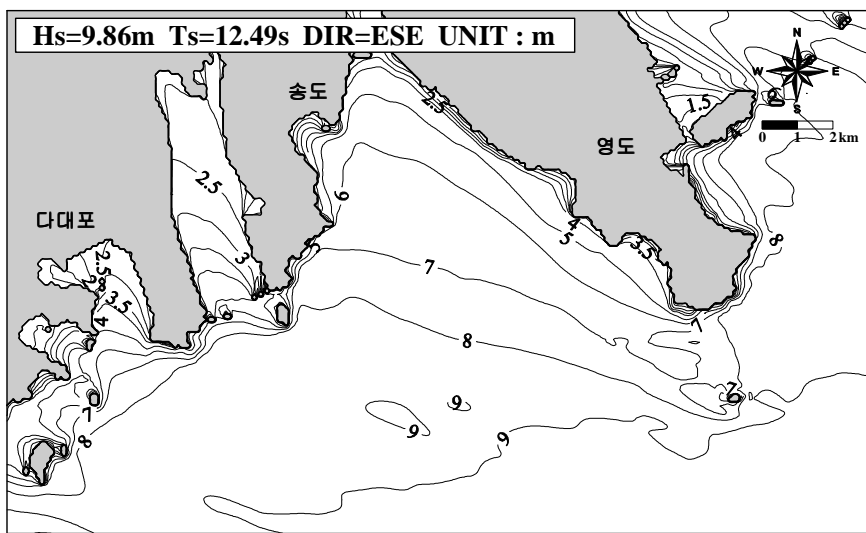


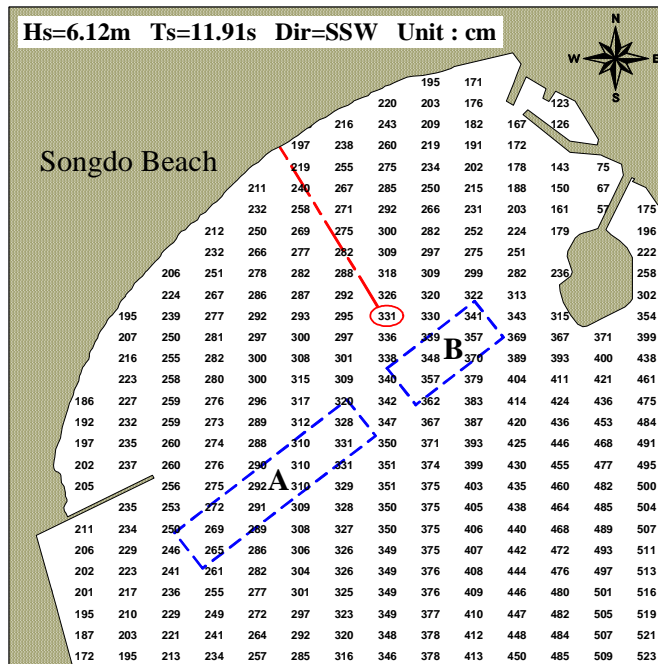
Fig. 4.8 Distribution of significant wave heights on Middle Area.(Dir=ESE)

4.4 협역에서 천해파랑의 추산결과

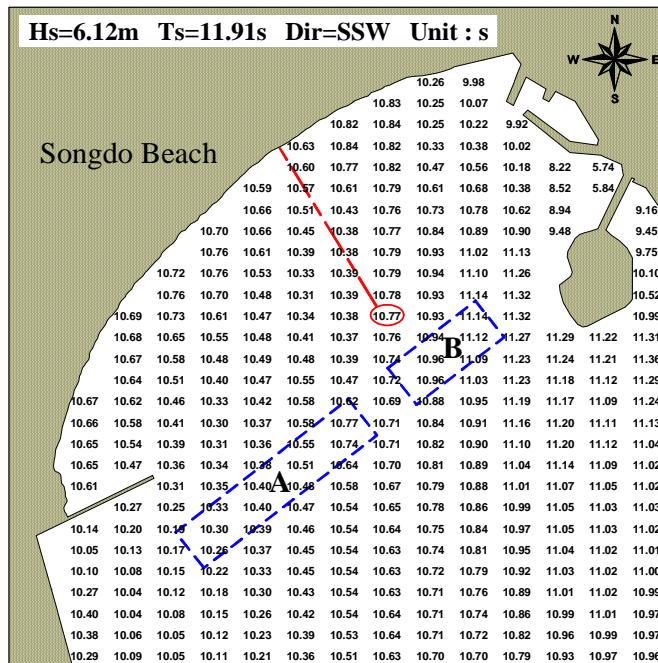
4.4.1 잠제가 없을 때

Fig. 4.9~4.12는 설계조위($App.H.H.W + SSH$)에 대하여 Table 4.1에서 제시한 심해파랑조건을 적용하여 송도해수욕장 전면해역의 위치별 유의파고와 유의주기분포를 나타낸 결과이다. 여기서, 제시되는 결과는 해안선으로부터 반사율이 고려되지 않은 입사파랑 성분만에 대한 것이다.

전체적으로 유의주기에 대해서는 심해파랑 지점 54(N34°80′, E129°00′)번의 S파향이, 유의파고는 심해파랑 지점 55(N34°94′, E129°17′)번의 SE파향이 비교적 큰 값의 분포를 나타내고 있다.



(a) Distribution of significant wave heights.



(b) Distribution of significant wave periods.

Fig. 4.9 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=SSW)

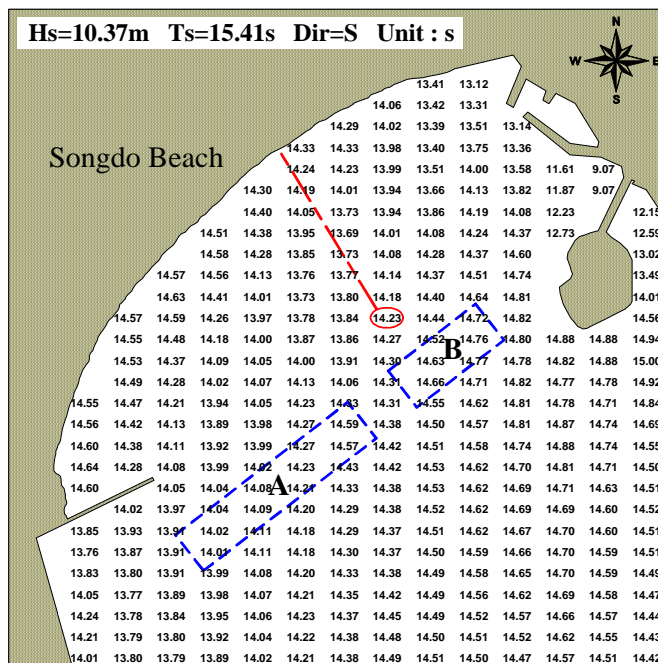
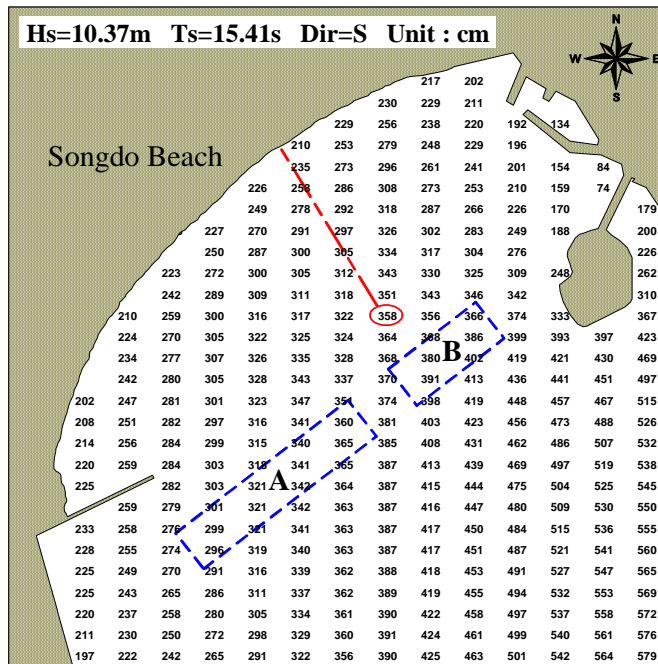
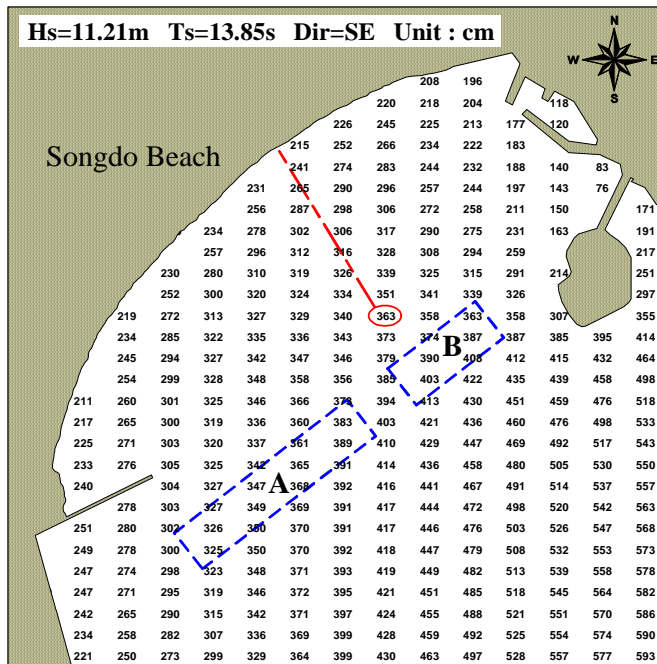
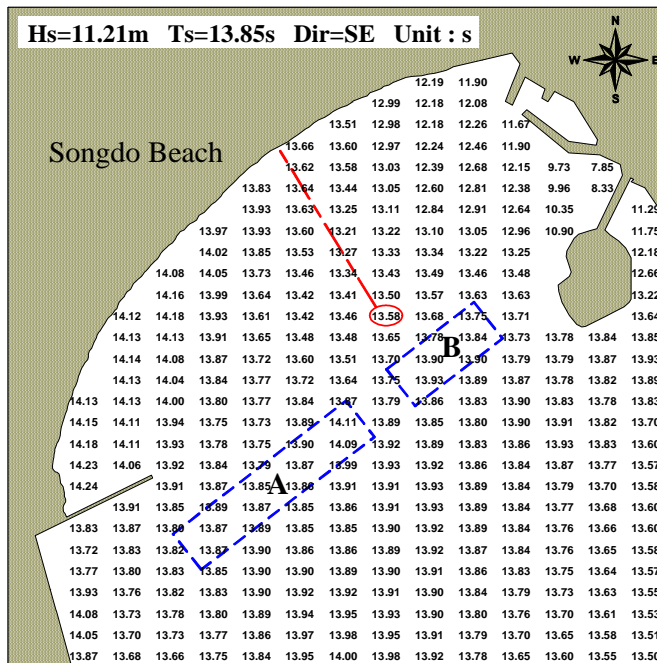


Fig. 4.10 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=S)



(a) Distribution of significant wave heights.



(b) Distribution of significant wave periods.

Fig. 4.11 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=SE)

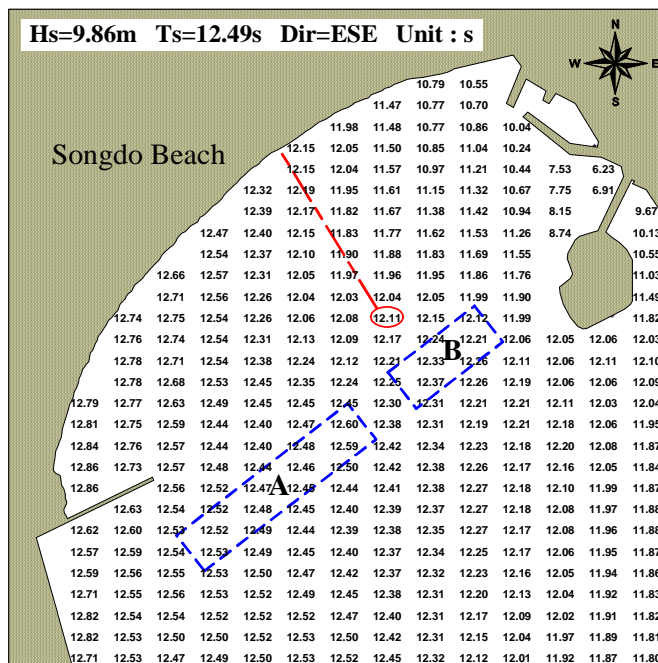
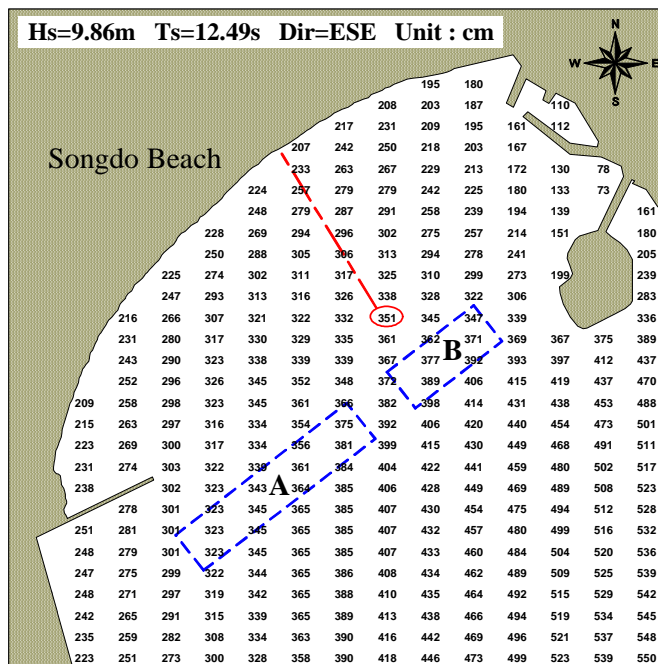


Fig. 4.12 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=ESE)

4.4.2 잠제가 있을 때

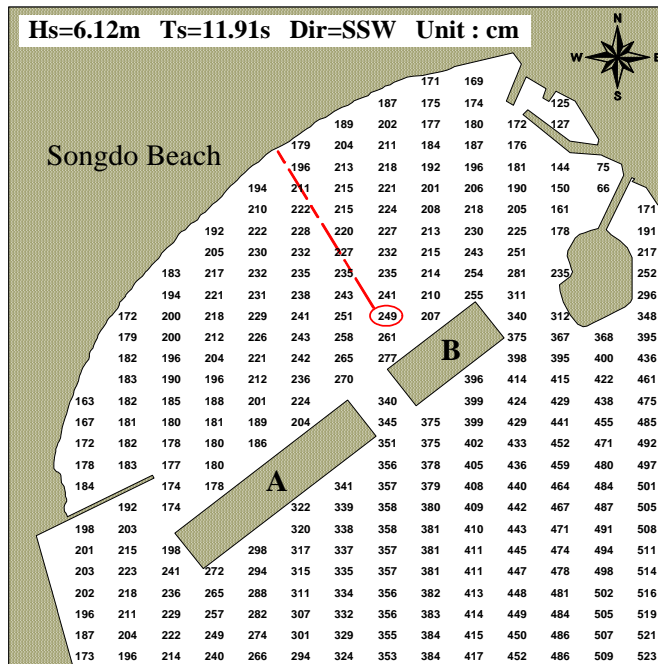
Table 4.2는 Fig. 4.9~4.12로부터 각각의 심해설계파 제원에 대하여 SWAN 모델을 사용하여 얻어진 천해파랑으로부터 잠제전면에서 산정된 파랑의 대표값과, 이 값을 바탕으로 VOF법으로부터 구조물 전·후면에서 산정된 반사율과 투과율을 나타낸다. 잠제B 전면에서 상대적으로 반사율과 투과율이 큰 값을 나타내고 있으나 그 차이는 미소하다. 여기서, 잠제의 위치는 송도해수욕장 연안 정비사업의 일환으로 수행된 침식방지시설 평면배치계획(잠제공)에서 안별 수치·수리모형실험 결과로부터 파랑감쇠효과, 해안침식방지효과, 경관 및 경제성을 고려하여 채택되어 현재 시공 완료된 곳이다(부산광역시 서구, 2002).

Fig. 4.13~4.16은 VOF법으로 산정된 구조물 전·후면에서의 반사율과 투과율을 SWAN모델에서 고려하여 다시 각 심해파랑지점에서의 심해설계파 제원을 사용하여 순차적으로 계산을 수행하여 산정된 위치별 유의주기와 유의파고분포를 나타낸 것이다.

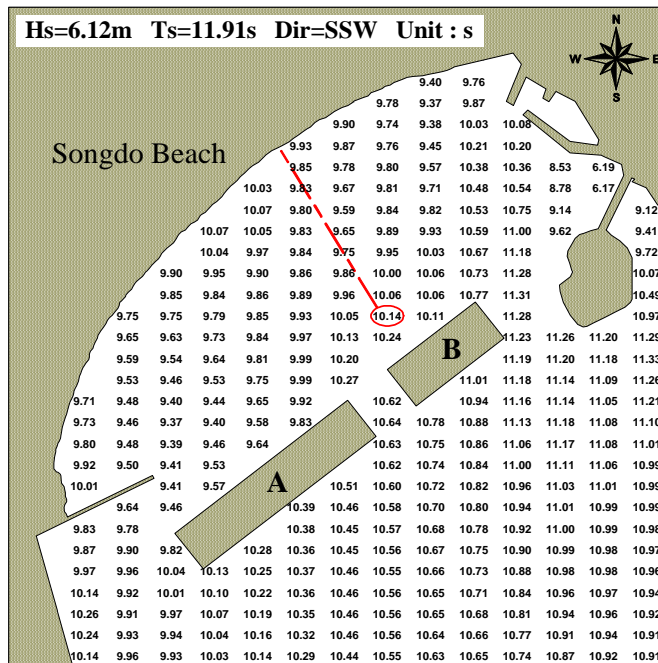
Fig. 4.9~4.12와 비교하여 Fig. 4.13~4.16은 잠제의 영향으로 잠제배후에서 유의주기와 유의파고분포가 작은 값을 나타내고 있다. 이는 송도해수욕장의 전면해역에 잠제의 설치로 인하여 상대적으로 정온화된 해역이 형성된다는 것을 나타내는 결과이다.

Table 4.2 Reflection and Transmission coefficient by submerged breakwaters.

파향	설계조위 (m)	잠제A 전면		잠제B 전면		잠제A		잠제B	
		$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	반사율	전달율	반사율	전달율
SSW	$App.H.H.W + SSH$ $DL(+)2.49$	10.47	3.06	11.03	3.78	0.34	0.61	0.43	0.57
S		14.21	3.39	14.69	4.11	0.29	0.60	0.36	0.60
SE		13.89	3.68	13.86	4.19	0.24	0.58	0.31	0.63
ESE		12.47	3.63	12.23	4.02	0.37	0.55	0.37	0.62

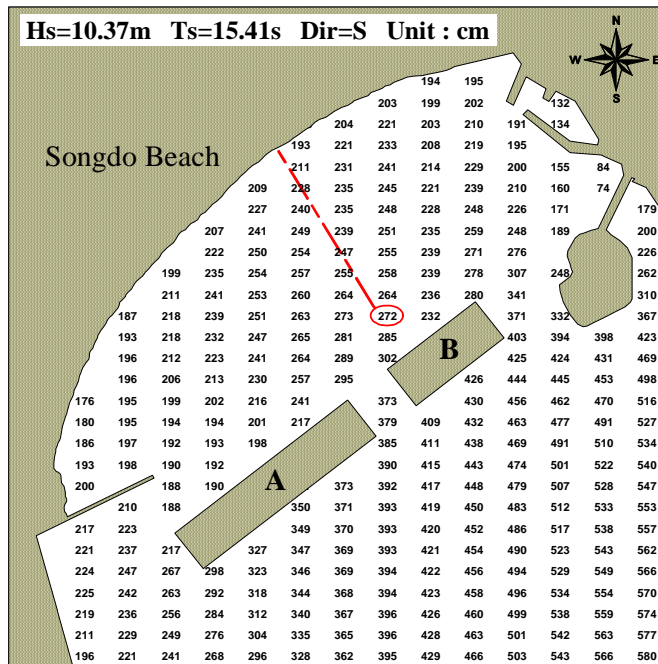


(a) Distribution of significant wave heights.

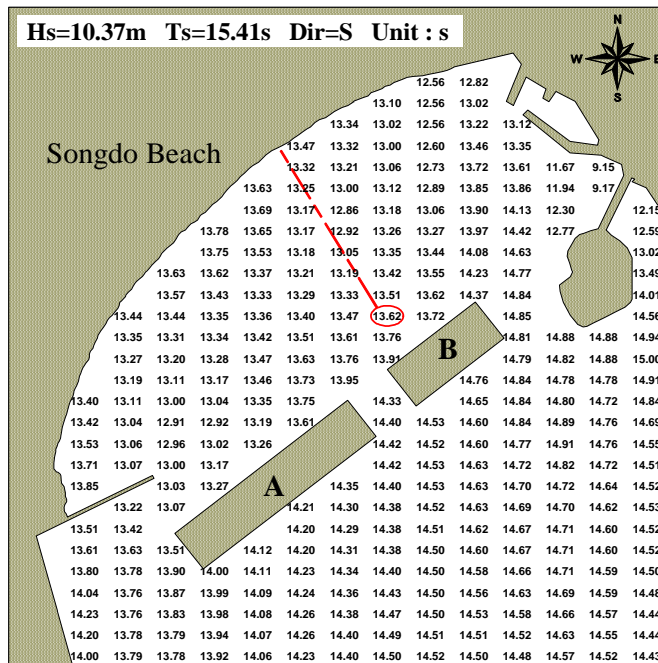


(b) Distribution of significant wave periods.

Fig. 4.13 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=SSW)

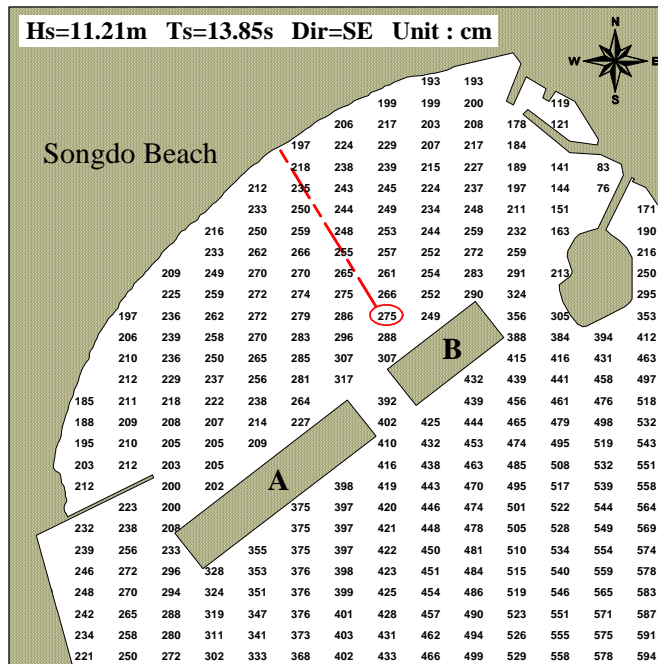


(a) Distribution of significant wave heights.

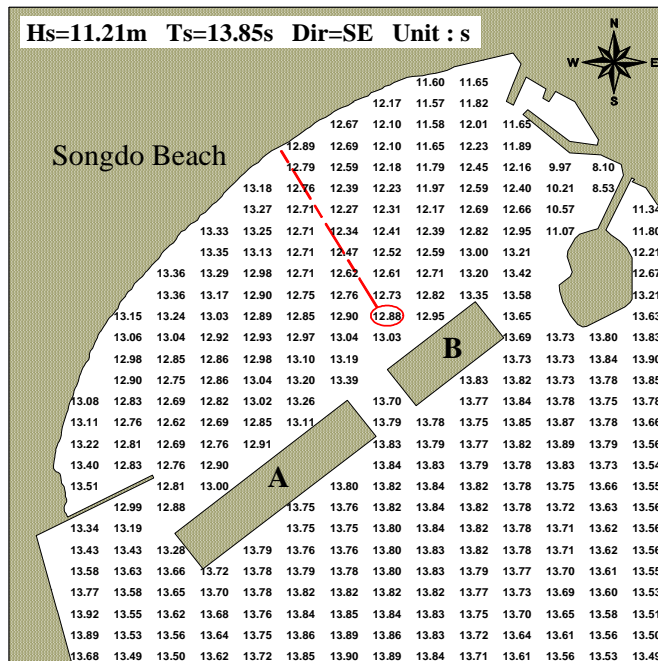


(b) Distribution of significant wave periods.

Fig. 4.14 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=S)

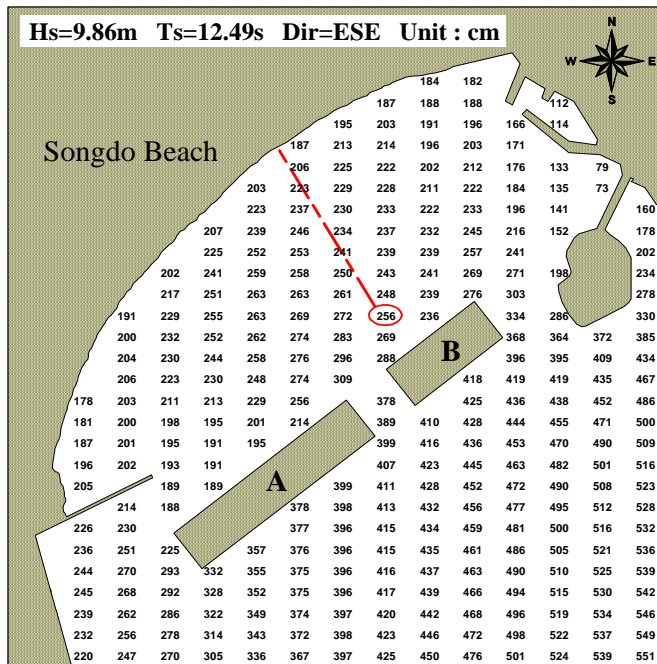


(a) Distribution of significant wave heights.

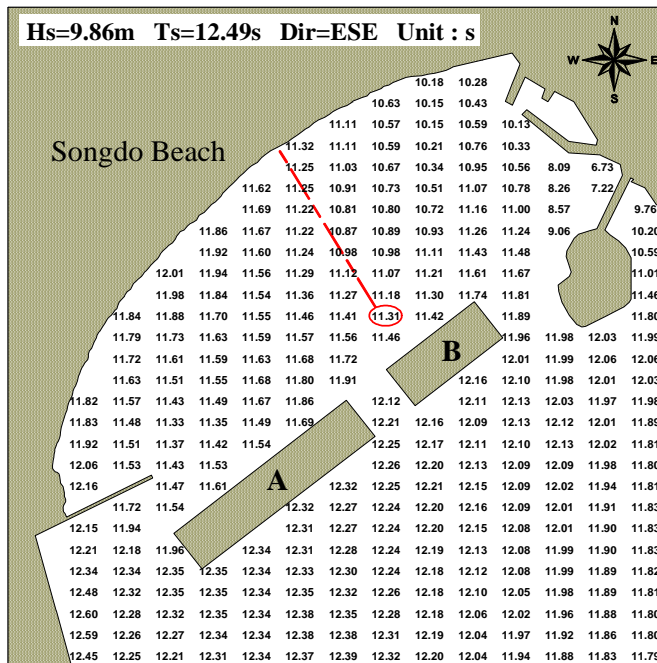


(b) Distribution of significant wave periods.

Fig. 4.15 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=SE)



(a) Distribution of significant wave heights.



(b) Distribution of significant wave periods.

Fig. 4.16 Distribution of significant wave heights and periods at Narrow Area.(Dir=ESE)

4.4.3 수위변화 및 월파해석을 위한 대표값 선정

Fig. 4.17은 송도해수욕장 주변과 전면해역을 개략적으로 나타낸 현재의 평면도이다. 송도해수욕장 전면해역의 수위변화 및 사빈상에서 월파를 산정하기 위하여 Fig. 4.17에서 나타낸 바와 같이 대표종단면을 선정하였다. 그리고, 이 대표종단면에 상응하는 단면을 Fig. 4.9~4.16에 파선으로 나타내었다. 선정된 대표종단면에 대하여 해석의 시작점에서 유의주기 및 유의파고를 Table 4.3에 나타내었다.

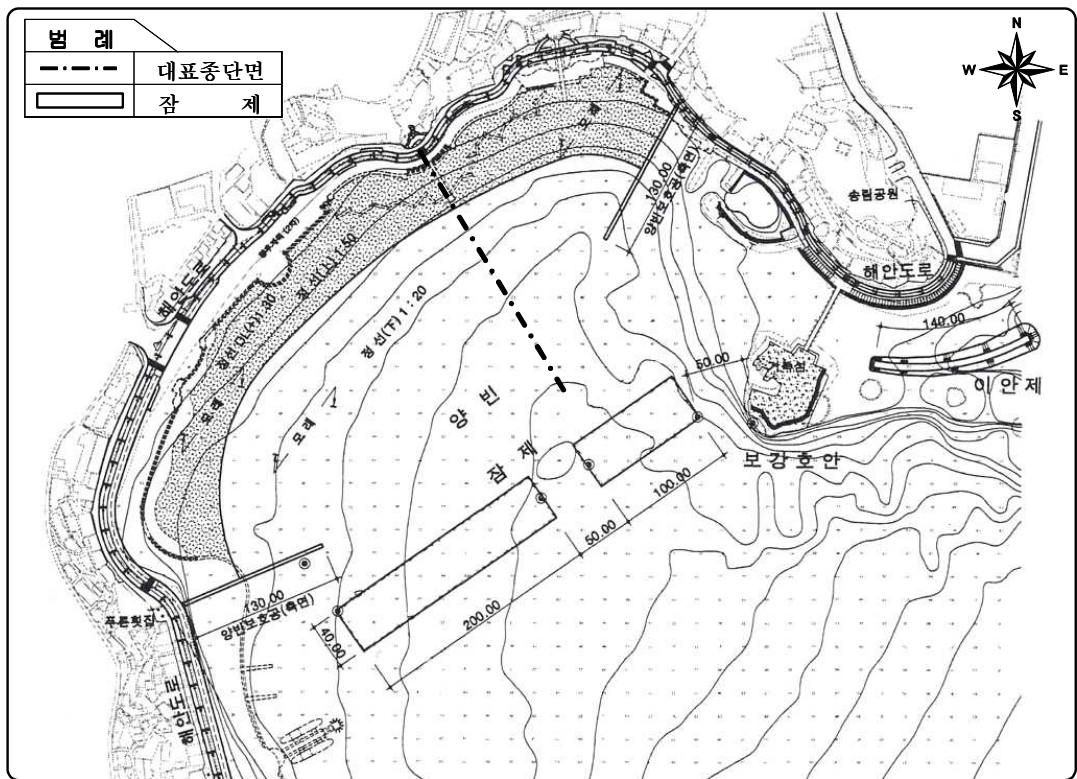


Fig. 4.17 A designed plane figure.

Table 4.3 Characteristics of incident waves.

파 향	잠 제 유 무	유 의 파 고 $H_{1/3}(m)$	유 의 주 기 $T_{1/3}(s)$
SSW	잠 제 무	3.31	10.77
S		3.58	14.23
SE		3.63	13.58
ESE		3.51	12.11
SSW	잠 제 유	2.49	10.14
S		2.72	13.62
SE		2.75	12.88
ESE		2.56	11.31

제 5장 사빈상에서 수위변화 및 월파해석

제 5장에서는 제 4장에서 산정된 수위변화 및 월파고해석의 시작점에서 주어진 유의파고 및 유의주기를 입사파랑의 제원으로 사용하여, 투과성잠제 및 해빈이 고려된 2차원 수치파동수로로부터 송도해수욕장 사빈상에서 양빈의 유무와 잠제의 유무에 따른 수위변화 및 월파고를 산정한다.

5.1 수치 파동수로

Fig. 5.1은 본 장에서 수위변화 및 월파를 해석하기 위하여 고려한 수치파동수로의 일례를 나타낸다. 수치파동수로는 좌측에 부가가상감쇠영역(Added Dissipation Zone)과 우측에 계산영역(Calculation Zone)을 두었다. 계산영역에서는 양빈 전, 양빈 후 및 잠제의 유무에 따른 송도해수욕장의 사빈 및 배후지의 구조물을 고려하였으며, 수치해석에서 적용한 입사파랑의 조건은 다음의 Table 5.1과 같다.

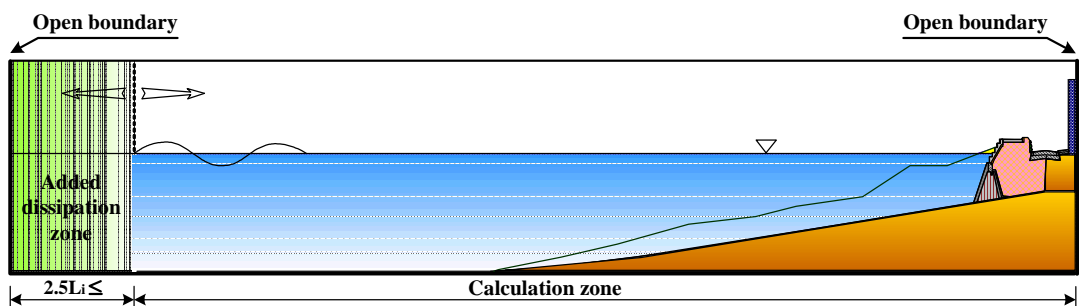


Fig. 5.1 Definition sketch of numerical wave channel.

Table 5.1 Conditions of incident waves.

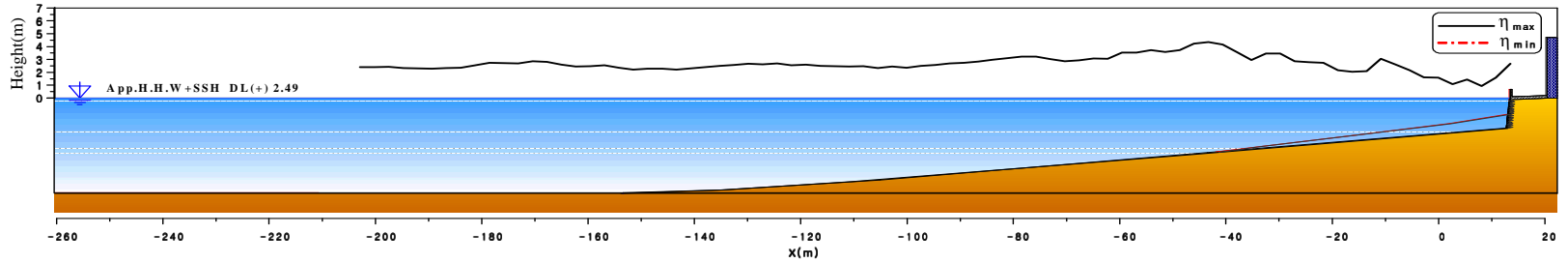
파 향	잠제유무	원 형		모 형		측 척
		$H_i (cm)$	$T_i (s)$	$H_i (cm)$	$T_i (s)$	
SSW	잠제 무	3.31	10.77	11.03	1.966	1/30
S		3.58	14.23	11.93	2.598	
SE		3.63	13.58	12.10	2.497	
ESE		3.51	12.11	11.70	2.210	
SSW	잠제 유	2.49	10.14	8.30	1.851	
S		2.72	13.62	9.07	2.487	
SE		2.75	12.88	9.17	2.352	
ESE		2.56	11.31	8.53	2.065	

여기서, T_i 는 입사파의 주기, H_i 는 입사파의 파고를 각각 나타낸다.

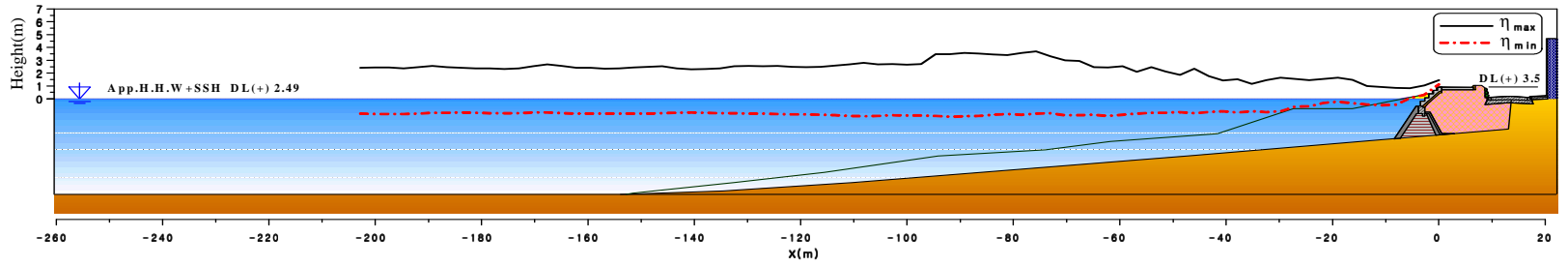
5.2 사빈상에서 수위변화

심해설계파 파향별로 파랑의 최대수위(n_{max})와 최소수위(n_{min}) 변화를 Fig. 5.2~5.5에 나타내었다. 각각의 그림에서 (a)는 양빈을 하기 전, (b)는 양빈을 한 후에 잠제가 설치되지 않은 경우, (c)는 양빈을 한 후에 잠제가 설치된 경우에 대하여 수위변화를 나타내었다.

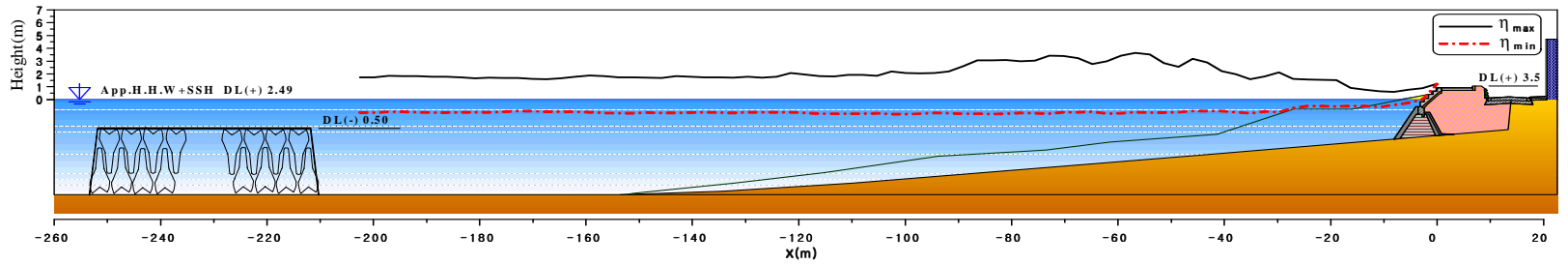
(a)와 (b)를 비교했을 때 양빈을 실시한 경우가 상대적으로 작은 수위변화를 나타내고 있다. 이는 입사파랑이 사빈상을 진행하면서 나타나는 유체의 마찰저항과 천수효과 및 침투 등으로 인한 영향으로 판단된다. (b)와 (c)의 양빈을 실시한 경우에 대해서는 잠제가 설치된 경우가 상대적으로 작은 수위변화를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 잠제 천단상에서 입사파랑의 쇄파와 앞서 언급한 사빈상에서 유체의 마찰저항, 그리고 천수효과, 침투 등으로 인한 영향으로 판단된다.



(a) Before beach fill.

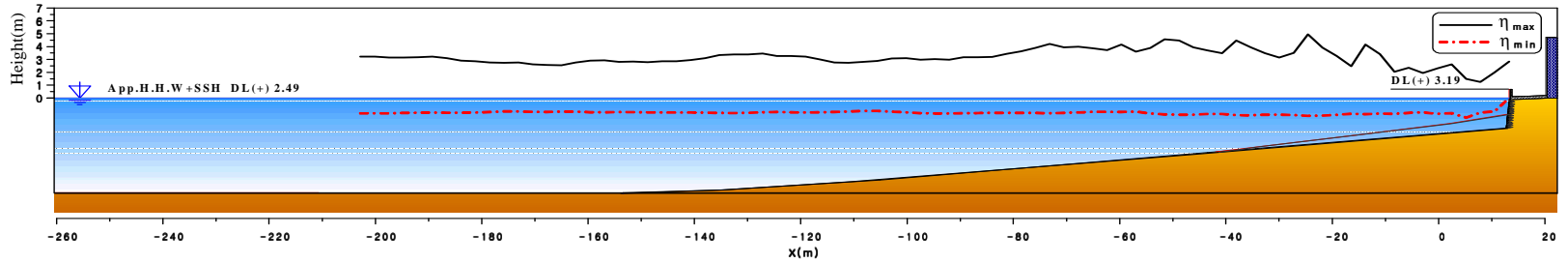


(b) After beach fill.(nonexistence of structure)

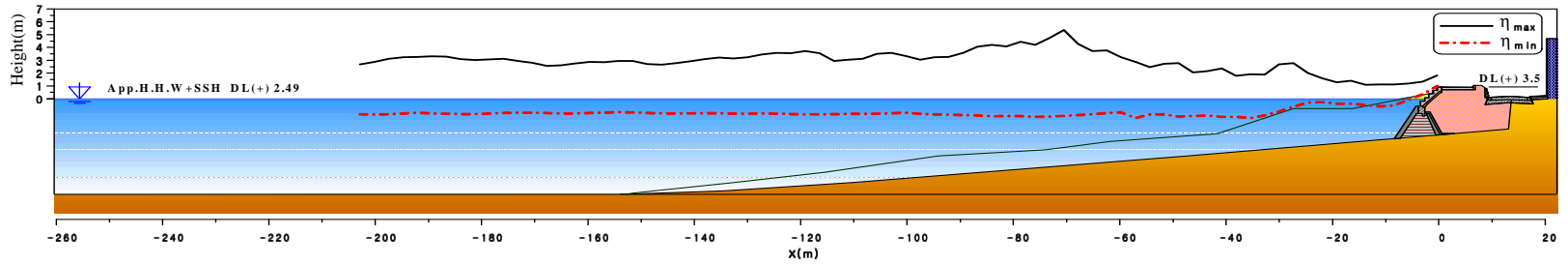


(c) After beach fill.(existence of structure)

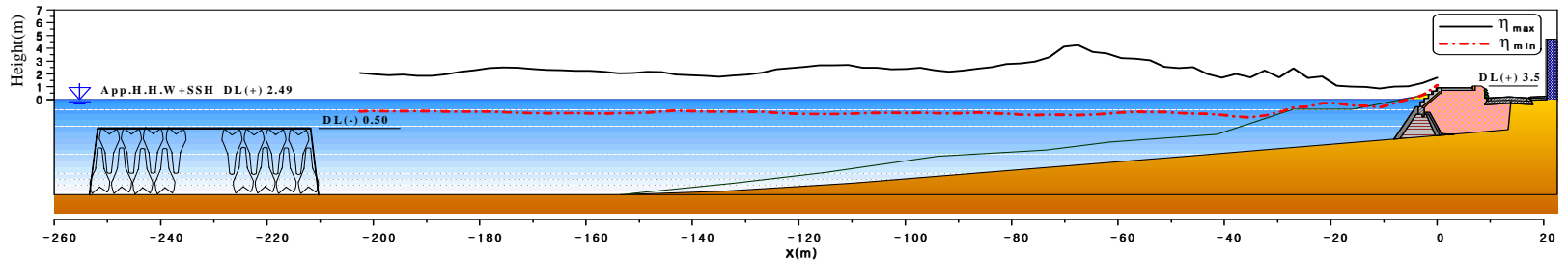
Fig. 5.2 Spatial distribution of η_{max} and η_{min} . (Dir=SSW)



(a) Before beach fill.

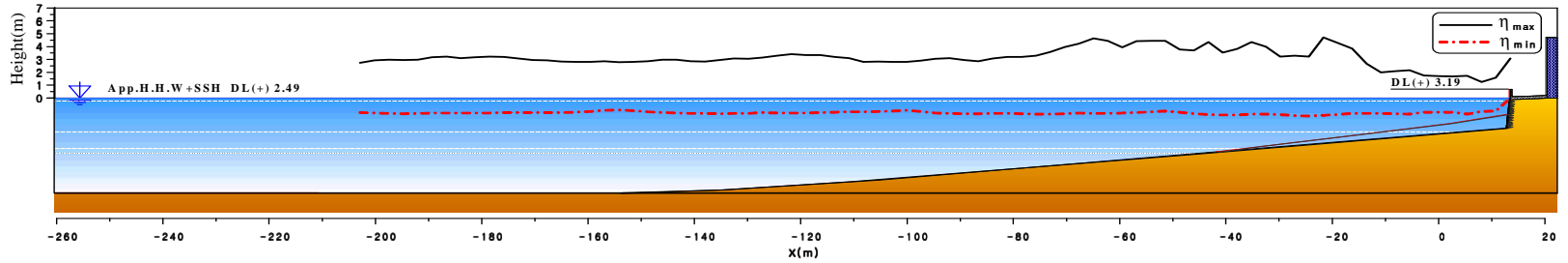


(b) After beach fill.(nonexistence of structure)

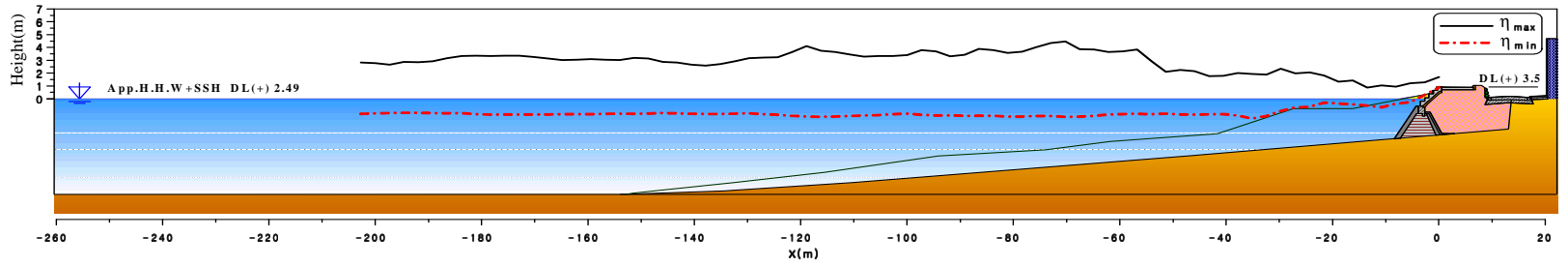


(c) After beach fill.(existence of structure)

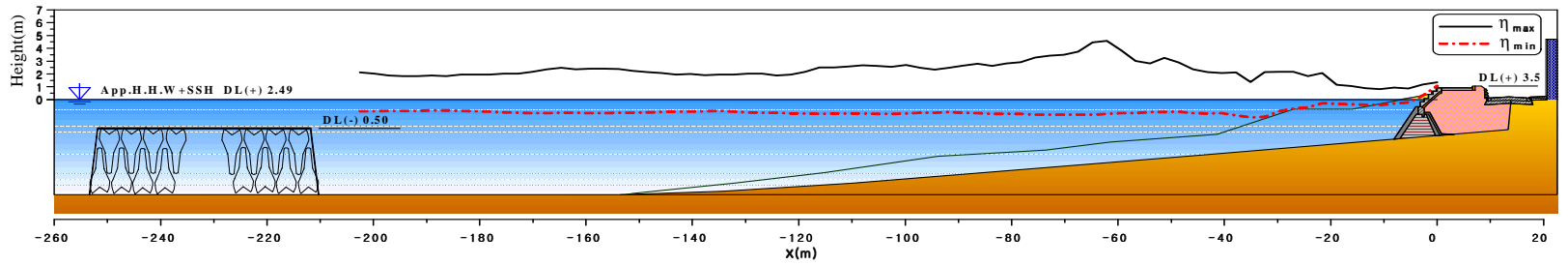
Fig. 5.3 Spatial distribution of η_{max} and η_{min} . (Dir=S)



(a) Before beach fill.

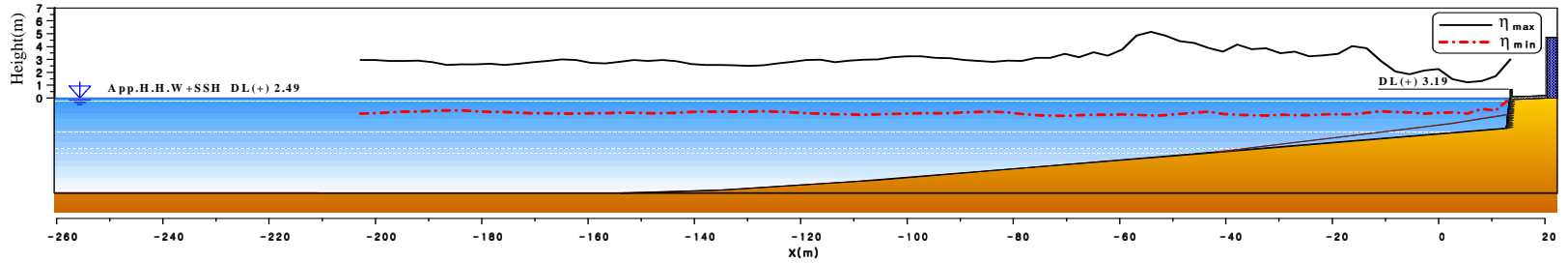


(b) After beach fill.(nonexistence of structure)

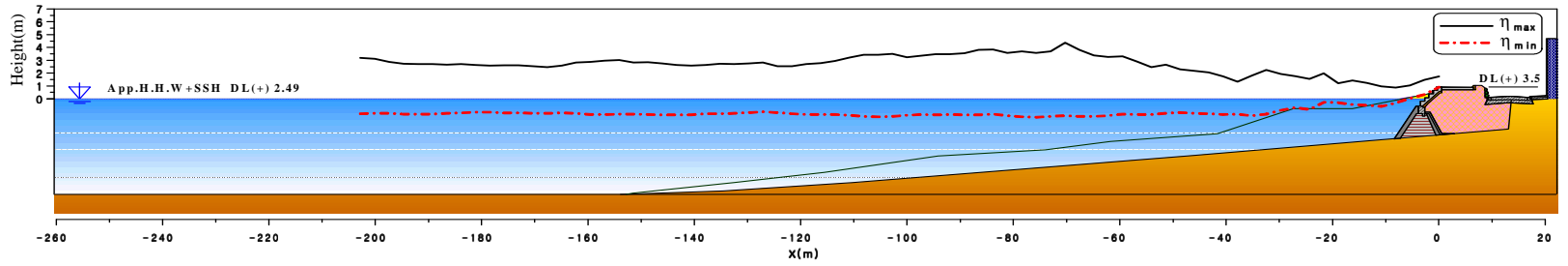


(c) After beach fill.(existence of structure)

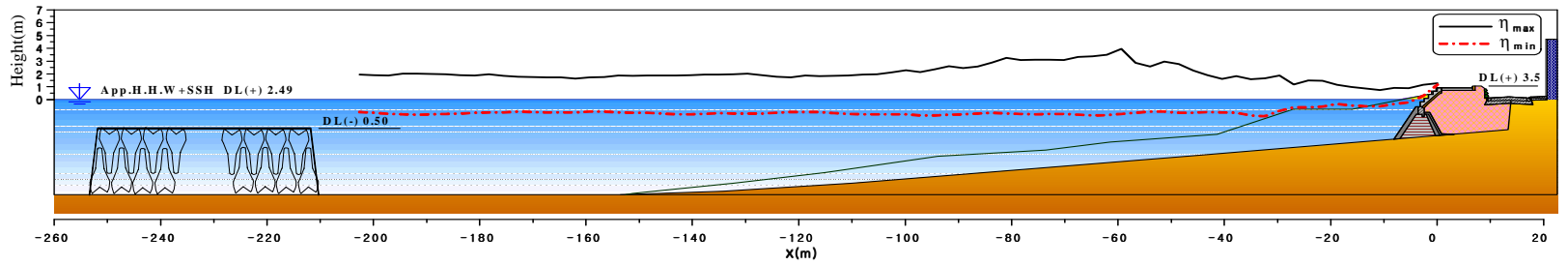
Fig. 5.4 Spatial distribution of η_{max} and η_{min} . (Dir=SE)



(a) Before beach fill.



(b) After beach fill.(nonexistence of structure)



(c) After beach fill.(existence of structure)

Fig. 5.5 Spatial distribution of η_{max} and η_{min} . (Dir=ESE)

5.3 사빈상에서 월파

Fig. 5.6는 Fig. 5.2~5.5에서 나타낸 각각의 결과에 대하여 사빈 끝단에서 파랑의 최대월파고를 나타낸 결과이다. 양빈을 하기 전, 양빈 후 잠제가 설치

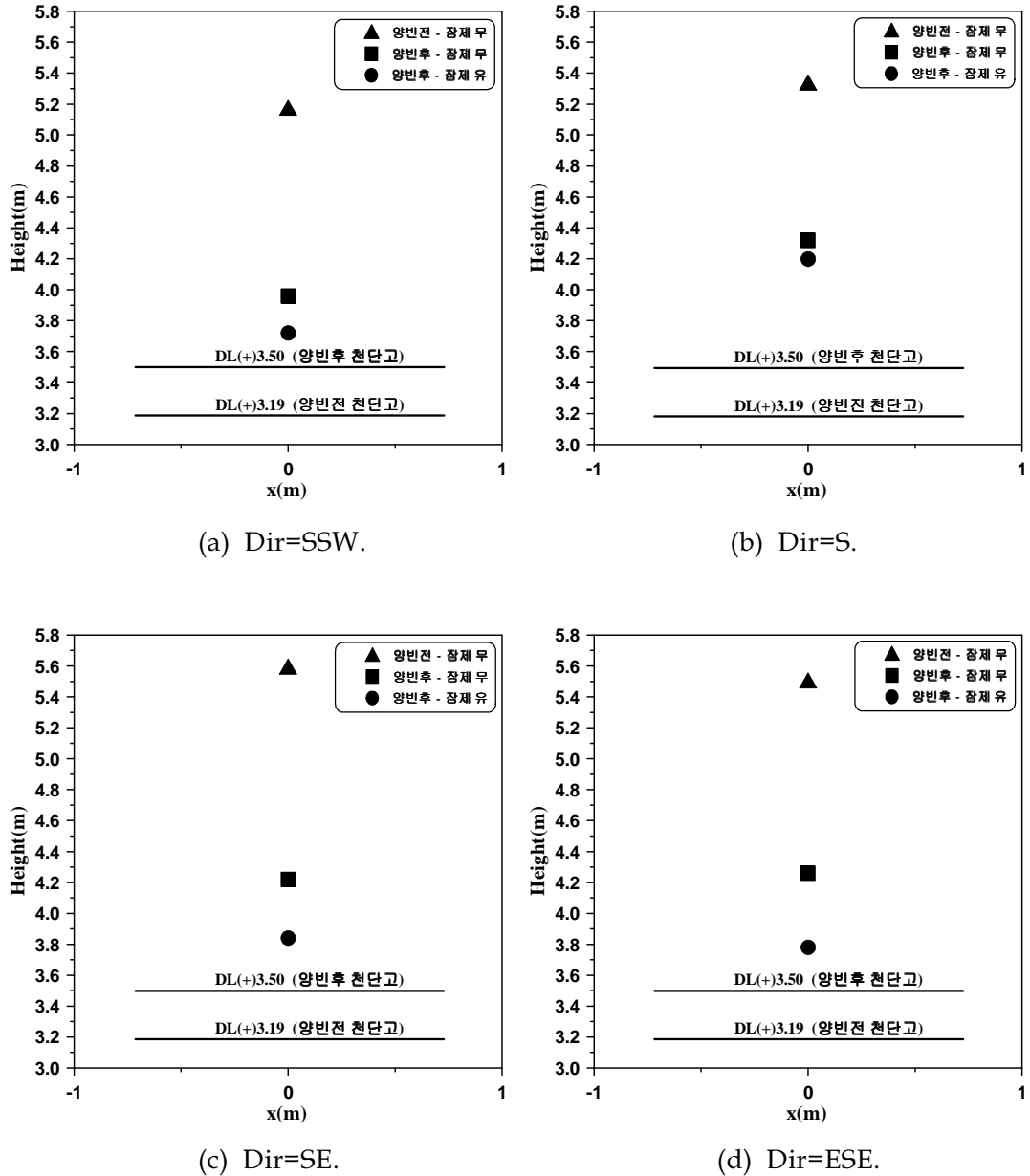
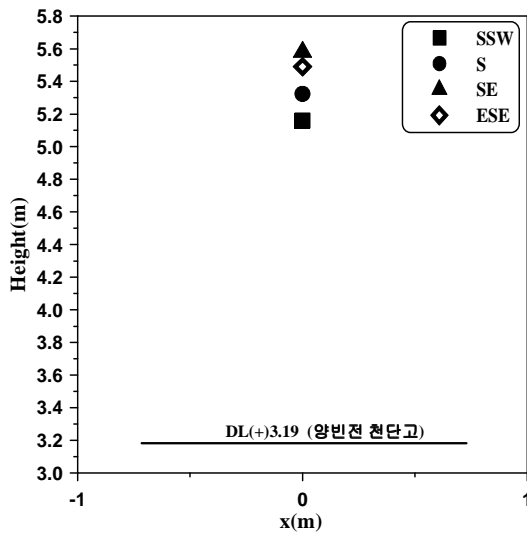


Fig. 5.6 Comparison of maximum overtopping heights.

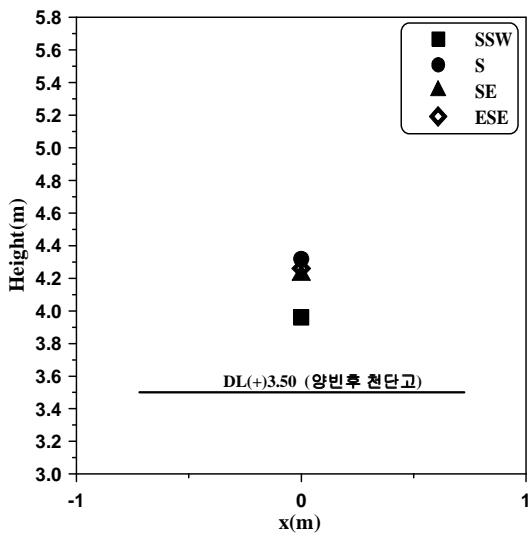
되지 않은 경우, 양빈 후 잠제가 설치된 경우의 순으로 월파 양상에 차이가 있음을 확인할 수 있다. 양빈 유무에 따라서는 평균적으로 최대월파고에 1.2m의 차이를 나타내고 있다. 양빈 후 잠제의 유무에 따라서는 최대월파고에 차이가 작게 나타나며, 이는 사빈상에서 쇄파로 인하여 입사파랑에너지의 큰 소산 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5.7은 파향별 최대월파고의 차이를 나타낸 것이다. Fig. 5.7(a)는 양빈전의 최대월파고를 나타낸 것으로 심해파랑 지점 55(N34°94', E129°17')번의 SE 파향이 가장 큰 월파고를 나타냄을 알 수 있다. Fig. 5.7(b)는 양빈 후 잠제가 미 설치된 경우 파향별 최대월파고를 나타낸 것으로 S, SE, ESE 파향이 비슷한 값을 나타낸다. 양빈 후 잠제가 설치된 경우 파향별 최대월파고를 나타낸 Fig. 5.7(c)에서는 심해파랑 지점 54(N34°80', E129°00')번의 S파향이 가장 큰 월파고를 나타내고 있다. 전체적으로 S파향이 송도해수욕장 사빈상에서 월파에 가장 큰 영향을 주고 있으며, 이에 반해 SSW파향이 가장 작은 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5.8은 Fig. 5.6(b)에 대하여 사빈 끝단에서 파랑의 월파를 나타낸 결과의 일례이다. 전술한 바와 같이 양빈을 하기 전, 양빈 후 잠제가 설치되지 않은 경우, 양빈 후 잠제가 설치된 경우의 순으로 월파 양상에 차이가 있음을 확인할 수 있다.

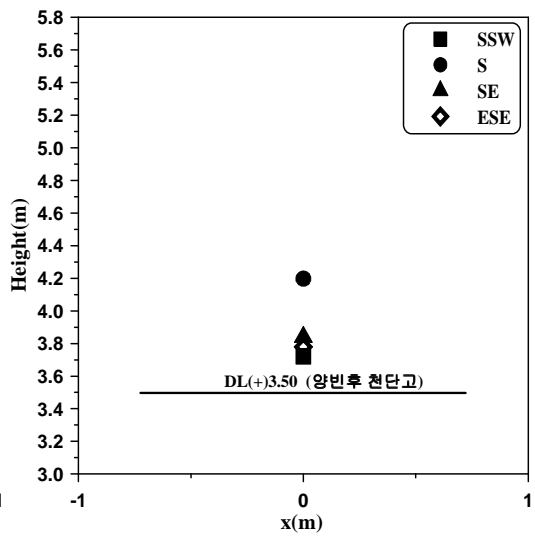


(a) Before beach fill.



(b) After beach fill.

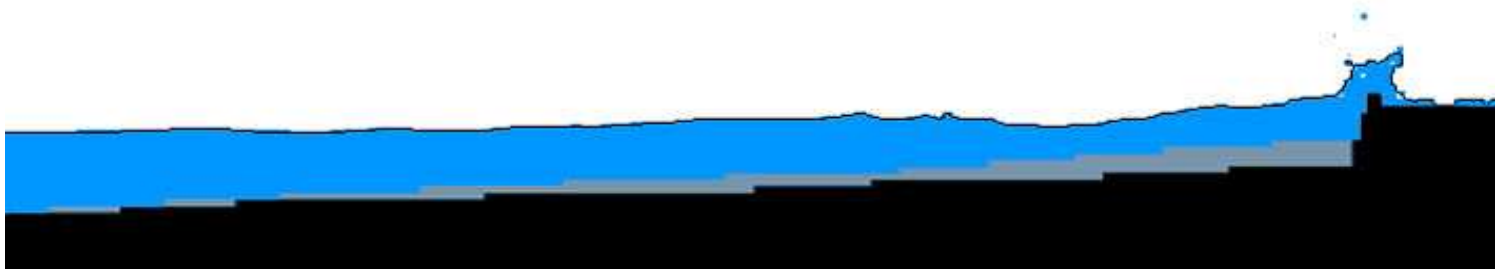
(nonexistence of structure)



(c) After beach fill.

(existence of structure)

Fig. 5.7 Comparison of maximum overtopping heights for each direction.



(a) Before beach fill.



(b) After beach fill.(nonexistence of structure)



(c) After beach fill.(existence of structure)

Fig. 5.8 Snapshots of Overtopping.

제 6장 결 론

본 연구는 국책사업인 연안정비사업의 일환으로 정비된 송도해수욕장을 대상으로 SWAN모델과 VOF법을 사용하여 폭풍해일고를 고려한 심해설계파를 적용하여 송도해수욕장 사빈상에서 수위변화 및 월파의 변화특성을 해석하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1) 양빈을 한 경우와 하지 않은 경우의 수위변화를 비교했을 때, 양빈을 한 경우가 상대적으로 작은 수위변화를 나타내고 있다. 이것은 사빈상에서 유체의 마찰저항, 침투 및 천수효과 등으로 인한 영향으로 판단된다.

(2) 양빈을 한 후 잠제가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우에 대하여 수위변화를 비교했을 때, 잠제가 설치된 경우가 상대적으로 작은 수위변화를 나타내고 있다. 이것은 잠제의 천단상에서 쇄파로 인하여 입사파랑에너지가 크게 소산 되었기 때문으로 판단된다.

(3) 호안천단에서 양빈을 한 경우와 하지 않은 경우에 대하여 최대월파고에 평균적으로 1.2m의 차이를 나타내고 있으며, 심해설계파 파향별로는 큰 차이를 나타내고 있지 않다.

(4) 호안천단에서 잠제의 유무에 따른 최대월파고의 차이는 평균적으로 0.33m이며, 심해설계파 파형별로 다소 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

(5) 심해설계파 파향별로 최대월파고의 차이를 비교했을 때, 양빈전에는 심해설계파 지점 55(N34°94', E129°17')번의 SE파향이 가장 큰 월파고를 나타냈으며, 양빈 후에는 대체로 심해설계파 지점 54(N34°80', E129°00')번의 S파향이 가장 큰 월파고를 나타내고 있다. 따라서, 이후 수행될 송도해수욕장에 대한 파랑해석시에는 심해설계파 지점 54(N34°80', E129°00')번의 S파향을 사용하는 것이 타당하리라 판단된다.

(6) 양빈의 유무에 따라서 파랑의 수위변동 및 최대월파고에 상당한 차이를 보이고 있으며, 잠제의 유무에 따라서도 차이를 확인할 수 있다. 따라서, 고파랑으로부터 송도해수욕장 인근지역을 보호하는데 사빈과 잠제가 중요한 역할을 수행하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 만조위시 대규모의 태풍이 내습한다면 송도해수욕장 배후역에서 월파로 인한 침수피해가 다소 예상된다.

〈 참고문헌 〉

- [1] 김도삼, 2005 : 남해안에서 폭풍해일고의 추정, 친환경 해안공간창조 국제 심포지움, 부산광역시 서구청.
- [2] 김도삼, 이광호, 허동수, 김정관, 2001 : VOF법에 기초한 불투과잠제 주변 파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 21(5-B), pp.551-560.
- [3] 김도삼, 이광호, 2002 : 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회지, 16(2), pp.1-5.
- [4] 부산광역시 서구, 2002 : 송도일원 침식방지공사 기본 및 실시설계 용역 보고서.
- [5] 한국해양연구원, 2005 : 전해역 심해설계과 추정 보고서Ⅱ.
- [6] 해양수산부, 2000 : 항만 및 어항설계기준.
- [7] Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978 : Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp.569-587.
- [8] Bouws, E. and G.J. Komen, 1983 : On the Balance between growth and dissipation in an extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea, J. Phys. Oceanogr., 13, pp.1653-1658.
- [9] Cavaleri, L. and P. Malanotte-Rizzoli, 1981 : Wind wave prediction in shallow water : Theory and applications. J. Geophys. Res., 86, No. C11, pp.10961-10973.

- [10] Collins, J.I., 1972 : Prediction of shallow water spectra, J. Geophys. Res., 77, No. 15, pp.2693-2707.
- [11] Eldeberky, Y., 1996 : Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- [12] Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1995 : Parameterization of triad interactions in wave energy models, Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, pp.140-148.
- [13] Günther, H., S. Hasselmann and P.A.E.M. Janssen, 1992 : The WAM model Cycle 4(revised version), Deutsch. Klim. Rechenzentrum, Techn. Rep. No. 4, Hamburg, Germany.
- [14] Hashimoto, N., IJ.G. Haagsma and L.H. Holthuijsen, 2003 : Four-wave interactions in SWAN, Proc. 28th Int. Conf. Coastal Engng.
- [15] Hasselmann, K., 1974 : On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, Bound.-layer Meteor., 6, 1-2, pp.107-127.
- [16] Hasselmann, K. and J.I. Collins, 1968 : Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction, J. Mar. Res., 26, pp.1-12.
- [17] Hasselmann, K., and T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P.Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973 : Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.

- [18] Hasselmann, S. K. Hasselmann, 1981 : A symmetrical method of computing the non-linear transfer in a gravity-wave spectrum, *Hamburger Geophys. Einzelscher., Serie A.*, 52, pp.8.
- [19] Hasselmann, S., K. Hasselmann, J.H. Allender and T.P. Barnett, 1985 : Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 11, pp.1378-1391.
- [20] Hirt, C.W., and B.D. Nichols, 1981 : Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, 39, pp.201-225.
- [21] Janssen, P.A.E.M., 1991a : Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, pp.1631-1642.
- [22] Janssen, P.A.E.M., 1991b : Consequences of the effect of surface gravity waves on the mean air flow, *Int. Union of Theor. and Appl. Mech. (IUTAM)*, Sydney, Australia, pp.193-198.
- [23] Jonsson, I.G. 1966 : Wave boundary layers and friction factors, *Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE*, 127-148.
- [24] Jonsson , I.G., 1980 : A new approach to rough turbulent boundary layers, *Ocean Engineering*, 7, pp.109-152.
- [25] Jonsson, I.G. and N.A. Carlsen, 1976 : Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer, *J. Hydraulic Research*, 14, pp.45-60.
- [26] Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann, 1984 : On the existence of

- a fully developed wind-sea spectrum, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, pp.1271 -1285.
- [27] Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen, 1994 : *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, pp.532.
- [28] Madsen, O.S., Y.-K. Poon and H.C. Graber, 1988 : Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, *Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, pp.492-504.
- [29] Madsen, P.A. and O.R. Sorensen, 1993 : Bound waves and triad interactions in shallow water, *Ocean Engineering*, 20, 4, pp.359-388.
- [30] Miles, J.W., 1957 : On the generation of surface waves by shear flows, *J. Fluid Mech.*, 3, pp.185-204.
- [31] Phillips, O.M., 1957 : On the generation of waves by turbulent wind, *J. Fluid Mech.*, 2, pp.417-445.
- [32] Pierson, W.J. and L. Moskowitz, 1964 : A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, *J. Geophys. Res.*, 69, 24, pp.5181-5190.
- [33] Snyder, R.L., Dobson, F.W., Elliott, J.A. and R.B. Long, 1981 : Array measurement of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 102, pp.1-59.
- [34] Tolman, H.J., 1992a : Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model, *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 10, pp.1095-1111.

- [35] WAMDI group, 1988 : The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., 18, pp.1775-1810.
- [36] Wu, J., 1982 : Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, J. Geophys. Res., 87, C12, pp.9704-9706.
- [37] 岩田好一郎, 川崎浩司, 金度三, 1994 : 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 42, pp.781-785.
- [38] 沿岸開発技術研究センタ, 2001 : CADMAS-SURF 数値波動修路の開発・研究, pp.10-29.